



ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ

Введение

Эрозионные процессы на склонах традиционно разделяются на плоскостной смыв, бороздковую и овражную эрозию. Наибольшее количество работ по моделированию процессов эрозии связано с плоскостным смывом и размывом по мелким бороздам. В этой области созданы широко используемые статистические и базирующиеся на физических принципах модели эрозии, накоплен большой материал натурных и лабораторных наблюдений для их верификации. На фоне этого значительного объема информации очень скромно выглядит комплекс работ по моделированию овражной эрозии. Достаточно сказать, что опубликовано лишь несколько динамических и статических моделей овражной эрозии [1–5], при том, что моделей плоскостного смыва можно легко насчитать несколько десятков. Еще меньше информации о лабораторных и натурных исследованиях динамики оврагов, необходимых для верификации подобных моделей, и тем большую ценность представляют подобные публикации [6, 7].

Не вполне понятно, почему сложилась такая ситуация. Овражная эрозия не менее опасна, чем плоскостная и бороздковая. В условиях широкого использования земель под пастбища овраги могут быть одним из главных факторов разрушения земель. Например в юго-восточной Австралии, в штате Новый Южный Уэльс, овражная эрозия (от умеренной до экстремальной) развита на 21% территории, а общий объем овражных форм составляет здесь около 3,2 млрд. м³, или 37% общего объема перемещенных почв за последние 100 лет наиболее интенсивной эрозии [8]. На Русской равнине за период широкомасштабного освоения земель (300–500 лет) объем овражных форм составил 4 млрд. м³ [9]. И хотя это только 4% от общего объема перемещенных всеми видами эрозии почв, из сельскохозяйственного оборота выведено более 15% земель [10]. Даже в благополучной Западной Европе, где интенсивность эрозии 2–3 т/га считается значительной, на отдельных полях объем эрозии в так называемых эфемерных оврагах (в донных врезах в пологих склоновых ложбинах) достигает 40–50 и до 80% от общего [11].

В последнее время интерес к исследованиям развития оврагов и прогнозированию этого процесса увеличился. В Международной биосферно-геосферной программе функционируют проекты "Флювиальные системы" [12] и "Деградация земель" [13], в рамках которых значительное внимание уделяется изучению специфических черт овражной эрозии. В научной программе "Ямал" РАО ГАЗПРОМ финансируются наблю-

дения за формированием оврагов и расчеты их роста для предотвращения опасных явлений на территориях газовых месторождений. В ходе выполнения этих проектов была разработана предлагаемая динамическая модель овражной эрозии.

Концепция эволюции продольного и поперечного профиля оврага

Предлагаемая динамическая модель эволюции оврага базируется на данных наблюдений за линейной эрозией на Русской равнине, севере Западной Сибири и в юго-восточной Австралии. Она предполагает существенное упрощение реального очень сложного гетерогенного процесса развития оврага, который включает как эрозионные, так и склоновые процессы. Принята концепция последовательного прохождения этих процессов. Каждый эрозионный эпизод (сток талых вод, дождевой паводок) делится на два этапа. На первом этапе рассчитывается эрозионный размыв, когда на первоначальном склоне или в днище эрозионной формы образуется прямоугольный врез с вертикальными стенками. Его ширина равна максимальной ширине потока плюс ширина зоны подмыва бортов оврага, а глубина определяется временем размыва (продолжительность эрозионного эпизода) и его интенсивностью. На втором этапе оценивается устойчивость такого вреза по отношению к плоскому оползню. Если глубина вреза превышает критическую высоту уступа, производится пересчет формы поперечного профиля из прямоугольного в трапецевидный. Ширина по днищу принимается равной максимальной ширине потока плюс суммарная ширина зоны подмыва бортов оврага за все время его развития, уклон бортов – уклону устойчивого откоса, а объем вреза – суммарному объему размыва за все время развития оврага. Предполагается, что эта трансформация полностью происходит в период между последовательными эпизодами эрозии, что является лишь первым приближением к реальному более медленному процессу выполаживания бортов оврага. Наиболее реалистично такая двухэтапная схема развития оврага выглядит для первой стадии его эволюции, когда овраг растет в основном в длину и в глубину. Согласно Б.Ф. Косову с соавторами, эта стадия занимает лишь 5% общего времени развития оврага, но в этот период формируется 80% его длины, 60% площади и 35% его объема [6].

Метод расчета эрозионного размыва днища и бортов оврага

В ходе эрозионного размыва грунтов, транспорта продуктов размыва и их отложения образуется эрозионный врез. Форма его продольного профиля определяется уравнениями баланса наносов и деформации:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial X} = C_w q_w + M_0 W + M_b D - CV_f W \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon) W \frac{\partial Z}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial X} + M_b D + C_w q_w \quad (2)$$

Здесь Z – минимальная отметка дна оврага (м); X (м) и t (с) продольная координата и время; $Q_s = QC$ – объемный расход взвешенных наносов; Q – расход воды (м³/с); C – средняя по глубине потока объемная концентрация наносов; C_w – объемная концентрация наносов в боковом притоке; q_w – удельный расход воды в боковом притоке (м³/с); M_0 (м/с) – интенсивность взмыва наносов со дна, если использовать терминологию В.М. Маккавеева [14]; M_b – интенсивность взмыва наносов с берегов русла (м/с); W – ширина потока (м); D – глубина потока (м); V_f – гидравлическая крупность частиц наносов в турбулентном потоке (м/с); ε – пористость размываемого грунта.

В уравнении баланса наносов наименее определенным является член, описывающий интенсивность взмыва наносов со дна русла. Она равна произведению придонной объемной мутности потока C_b на придонную вертикальную скорость U_v : $M_0 = C_b U_v$.

Гидравлические характеристики погожа, баланс наносов и механические свойства грунтов в экспериментальных лотках в овраге Брук Крик, бассейн р. Ясс, Новый Южный Уэльс, Австралия

Лоток	Попуск	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$U, \text{м/с}$	$W, \text{м}$	$D, \text{м}$	S	$C \cdot 10^{-3}$	$Ch, \text{кПа}$	$\tau_{cr}, \text{Па}$	$(1/W) \cdot dQ/dX,$ $\text{м/с} \cdot 10^{-5}$	$\rho g UDS,$ $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$
1	1	0,0014	0,420	0,180	0,019	0,063	1,039	29	10,0	0,081	0,049
1	2	0,0022	0,370	0,170	0,034	0,063	1,143	29	8,3	0,145	0,078
1	3	0,0042	0,580	0,177	0,041	0,063	1,343	29	7,8	0,316	0,015
1	5	0,0086	0,640	0,208	0,064	0,068	0,969	29	6,7	0,368	0,273
1	6	0,0078	0,600	0,220	0,060	0,064	1,271	29	6,9	0,433	0,224
2	3	0,0015	0,534	0,120	0,023	0,285	1,714	31	11,0	0,576	0,349
2	4	0,0023	0,644	0,130	0,028	0,285	1,434	31	10,0	0,680	0,499
2	5	0,0041	0,587	0,165	0,042	0,240	0,908	31	8,7	0,566	0,578
2	6	0,0057	0,641	0,190	0,047	0,240	2,159	31	8,4	1,770	0,709
2	7	0,0086	0,730	0,233	0,034	0,248	1,391	31	9,3	1,370	0,893
2	9	0,0110	1,127	0,277	0,035	0,252	2,294	31	9,2	2,490	0,981
3	3	0,0011	0,830	0,120	0,008	0,577	2,460	50	36,0	0,351	0,509
3	4	0,0015	1,726	0,132	0,007	0,578	1,872	52	42,0	0,341	0,646
3	5	0,0019	1,709	0,142	0,008	0,579	2,180	52	40,0	0,460	0,747
3	6	0,0023	1,817	0,151	0,009	0,580	2,216	53	40,0	0,542	0,879
3	7	0,0032	1,700	0,195	0,009	0,582	2,500	54	40,0	0,650	0,922
3	8	0,0041	1,900	0,177	0,012	0,584	1,212	59	44,0	0,431	1,330
3	9	0,0049	1,900	0,195	0,013	0,588	1,746	61	45,0	0,697	1,460
3	10	0,0063	0,720	0,202	0,015	0,590	1,668	64	48,0	0,839	1,810
3	11	0,0083	0,800	0,226	0,018	0,594	1,775	74	60,0	1,030	2,150

Согласно К.И. Россинскому и В.К. Дебольскому [15], придонная вертикальная скорость частиц пропорциональна средней скорости потока. Придонная мутность является мерой вероятности отрыва частиц от дна, которая, по Г. Эйнштейну [16], есть функция отношения касательного напряжения на дне потока и его критического значения, при котором начинается отрыв частиц наносов: $C_b = F(\tau/\tau_{cr})$. Вид этой функции в широком диапазоне гидравлических параметров потока и крупности частиц наносов исследовался в работах по русловым процессам в несвязных грунтах. Для связных грунтов, наиболее типичных при овражной эрозии, экспериментальных данных для определения функции F существенно меньше. Поэтому целесообразно привести результаты специальных натурных измерений в оврагах в Австралии.

В бассейне р. Ясс в 200 км к востоку от Канберры на склонах оврага Брук Крик в естественных грунтах были подготовлены 3 лотка длиной соответственно 9,7; 3,5 и 6,0 м (табл. 1). Вода подавалась в вершину лотка из бака объемом 15 м³ с постоянным расходом до 12 л/с, который контролировался переносным треугольным водосливом. Пробы воды на мутность отбирались в середине и в конце каждого попуска в начале и конце лотка для расчета баланса наносов по его длине. Связность грунтов C_h измерялась в конце каждого попуска с помощью крыльчатки.

Анализ данных экспериментов показывает, что в условиях больших уклонов, характерных для овражных врезов, функция $F(\tau/\tau_{cr})$ линейна, и интенсивность взмыва наносов определяется произведением донного касательного напряжения на среднюю скорость потока:

$$M_0 = k_e \rho g U D S \quad (3)$$

Здесь ρ – плотность воды (кг/м³); g – ускорение свободного падения; U – средняя скорость потока; S – уклон свободной поверхности воды; k_e – коэффициент эродированности грунтов. Величина этого коэффициента определяется критическим касательным напряжением τ_{cr} , по данным табл. 1 $k_e = 1,91 \cdot 10^{-6}/\tau_{cr}$.

Как показал Ц.Е. Мирцхулава [17], τ_{cr} зависит от сил трения и сцепления:

$$\tau_{cr} = 1,2 \lambda (m/n) [(\rho_s - \rho)gd + 1,25 C_f^n K] \quad (4)$$

Здесь λ – коэффициент гидравлического сопротивления; m – коэффициент условий работы, равный 1,0 для чистой воды и 1,4 для потоков с содержанием коллоидальных частиц $> 0,1$ кг/м³; параметр турбулентности n обычно равен 4,0; ρ_s – плотность наносов (кг/м³); d – средний диаметр агрегатов грунта (м); K – коэффициент неравномерности механических свойств грунта, обычно 0,5; C_f^n – усталостная прочность грунта, обычно функция его связности C_h (Па). Анализ данных табл. 1 показывает, что при измерении сцепления крыльчаткой усталостное напряжение грунта можно рассчитать по формуле:

$$C_f^n = 6,7 \cdot 10^{-7} C_h^2 \quad (5)$$

Процесс размыва берегов в днище оврага исследован недостаточно. В первом приближении скорость размыва берегов dW_b/dt , которая (с учетом пористости грунтов) равна интенсивности взмыва наносов с берегов $M_b/(1-\epsilon)$, может быть рассчитана с помощью формулы

$$W_b = M_0 V / U \quad (6)$$

Здесь V – поперечная скорость.

Так как поток в днище оврагов обычно меандрирует, для оценки V можно использовать формулу И.Л. Розовского [18]:

$$V = 11,0 UD/R. \quad (7)$$

Соотношение относительной ширины W/W_b оврага и доли длины долины P_e , подверженной размыву меандрирующим руслом

№ участка	Ширина русла, W (м)	Ширина днища, W_b (м)	Длина долины, L (м)	Длина фронта размыва, l_r (м)	W/W_b	P_e
1	0,163	0,934	10,0	4,05	0,175	0,41
2	0,217	0,823	5,0	0,70	0,264	0,14
3	0,258	0,472	5,0	2,85	0,547	0,57
4	0,306	0,360	5,0	3,45	0,85	0,69
5	0,470	0,925	5,0	1,95	0,508	0,39
6	0,960	2,120	25,0	8,25	0,453	0,33
7	0,657	1,300	40,0	21,5	0,505	0,54
8	0,271	0,526	31,5	22,5	0,515	0,71
9	0,316	0,954	17,0	10,0	0,331	0,59

В узком врезанном днище оврага с $W_b < 10,0 W$ радиус кривизны R ограниченных излучин потока тем больше, чем меньше ширина днища оврага W_b :

$$R = 50,0 W(W/W_b) \quad (8)$$

По мере размыва берегов и увеличения W_b радиус кривизны излучин русла уменьшается. Когда W_b становится $> 10,0 W$, поток формирует свободные излучины с $R = 0,5 W$. В этих условиях поток размывает только часть длины бортов оврага, и эта доля P_e уменьшается с увеличением относительной ширины днища. Исследования в овраге на территории Бованенковского месторождения полуострова Ямал показали, что $P_e = W/W_b$ (табл. 2).

После учета всех приведенных выражений формула для расчета скорости размыва бортов в днище оврага приобретает вид:

$$(1 - \varepsilon) \frac{dW_b}{dt} = k_b M_0. \quad (9)$$

Здесь $k_b = 0,22 D/W$, если $W_b > 10,0 W$ и $k_b = 2,2 D/W_b$, если $W_b < 10,0 W$. При $W_b > 20,0 W$ размыв бортов оврага практически прекращается.

Размыв грунтов днища оврага и его бортов происходит при условии, если скорость потока U превосходит критическое значение U_{cr} , при котором начинается отрыв частиц наносов от грунта. В случае наличия в грунте растительных остатков или плотной дернины скорость потока должна быть достаточна для разрушения сцепления растительных остатков или дернины.

Результаты измерений гидравлико-морфометрических характеристик стока в эрозионных формах полуострова Ямал и юго-восточной Австралии позволили установить ряд закономерностей изменения морфометрии потоков.

1) Ширина потока W и его максимальная глубина D_m определяются расходом воды Q

$$W = 3,0 Q^{0,4} \quad (10)$$

$$D_m = 0,8 Q^{0,45} \quad (11)$$

2) Форма живого сечения в оврагах разнообразная – близкая к треугольной на изогнутых плесах, параболическая на прямолинейных плесах, с пониженными глубинами в центре русла на перекатах. Обычно средняя глубина D составляет $0,6 D_m$.

Среднее значение коэффициента шероховатости по Маннингу n в руслах оврагов без дернины равно $0,12$. Если поток течет по склону с дерниной, значение коэффици-

ента шероховатости увеличивается до 0,4. Эти значения относятся только к оврагам на Ямале, и для других объектов должны быть откорректированы по данным исследований.

Эволюция поперечного профиля оврага

Форма поперечного сечения эрозионного вреза, сформированного за время Δt , это прямоугольник шириной W_b и высотой ΔZ . В качестве характерного времени Δt целесообразно принять период снеготаяния или время прохождения паводка. Между паводками поперечный профиль эрозионного вреза трансформируется склоновыми процессами (оползанием, оплыванием грунта и пр.). Формируется устойчивый откос. На первом этапе развития оврага склоновые процессы происходят интенсивно, оползает грунт мелкими блоками, часто грунты оплывают. В результате формируются прямые и слабовыпуклые склоны. Если глубина вреза ΔZ больше критической глубины

$$D_v = \frac{2,0C_h}{g\rho_s} \cos(\varphi) / \sin^2 \frac{1}{2} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right), \quad (12)$$

то прямоугольный эрозионный врез трансформируется в трапецию шириной по днищу W_b , глубиной

$$D_t = \left(\sqrt{W_b^2 + \frac{4V_0}{\operatorname{tg}(\varphi)}} - W_b \right) \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{2} \quad (13)$$

и шириной по верху

$$W_t = W_b + \frac{2,0D_t}{[\operatorname{tg}(\varphi)]}. \quad (14)$$

Здесь V_0 – объем вреза. Крутизна устойчивого откоса бортов оврага φ может быть рассчитана с помощью формулы:

$$\frac{C_h}{g\rho_s D_v} = \frac{\rho_s - w\rho}{\rho} \operatorname{tg}(\varphi) \cos^2(\varphi) - \frac{\sin(2\varphi)}{2}. \quad (15)$$

Здесь w – объемное содержание воды в грунте, φ – угол внутреннего трения, C_h – сцепление грунта (Па); ρ_s – объемная плотность грунта; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

Расчетная схема трансформации продольного профиля оврага

На основании базовых уравнений баланса наносов и деформации (1–2) и формулы для расчета интенсивности размыва (3) записывается уравнение для расчета трансформации продольного профиля оврага

$$\frac{\partial Z}{\partial t} - k_e U D \frac{\partial Z}{\partial x} - V_f C = 0. \quad (16)$$

Для решения уравнения (16) используется явная двухуровневая консервативная схема Лакса-Вендрофа типа предиктор – корректор:

$$Z_i^{j+1/2} = (1-\beta)Z_i^j + \beta Z_{i+1}^j - \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{(k_e q)_{i+2}^j + (k_e q)_{i+1}^j}{2} Z_{i+1}^j - \frac{(k_e q)_{i+1}^j + (k_e q)_i^j}{2} Z_i^j \quad (17)$$

$$Z_i^{j+1} = Z_i^j - \frac{\Delta t}{2\alpha\Delta x} (\alpha - \beta) \frac{(k_e q)_{i+2}^j + (k_e q)_{i+1}^j}{2} Z_{i+1}^j - (2\beta - 1) \frac{(k_e q)_{i+1}^j + (k_e q)_i^j}{2} Z_i^j +$$

$$+ (1 - \alpha - \beta) \frac{(k_e q)_i^j + (k_e q)_{i-1}^j}{2} Z_{i-1}^j + \frac{(k_e q)_{i+1}^j + (k_e q)_i^j}{2} Z_i^{j+1/2} - \\ - \frac{(k_e q)_i^j + (k_e q)_{i-1}^j}{2} Z_{i-1}^{j+1/2} + C_i V_f \Delta t$$

Здесь индекс i определяет изменение величин по длине русла, индекс j – во времени, α и β – сеточные числа, для которых наилучшим является соотношение: $\beta = 0,75-1,0$; $\alpha = 0,25-0,5$; $q = UD$ – удельный расход воды.

Для устойчивости схемы необходимо выполнение следующего соотношения величин шага по длине Δx и шага по времени Δt

$$k_e q \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (18)$$

Величина текущей концентрации наносов C определяется интегрированием уравнения баланса наносов по длине оврага на участке длиной Δx :

$$C_i = \left(C_{i-1} - \frac{(k_e + k_b) Q_{i-1} S}{q_w (Y + 1)} - \frac{C_w}{Y} \right) \left(\frac{Q_{i-1}}{Q_i} \right)^Y + \frac{(k_e + k_b) Q_i S}{q_w (Y + 1)} + \frac{C_w}{Y} \quad (19)$$

Здесь $Y = (q_w + V_f W) / q_w$. Индекс i определяет изменение мутности на отрезке от x_{i-1} до x_i , $q_w = (Q_i - Q_{i-1}) / \Delta x$ – удельный расход бокового притока воды, Δx – расстояние между соседними створами.

Если расход воды на отрезке от x_{i-1} до x_i неизменен, концентрация наносов в точке i описывается формулой:

$$C_i = C_{i-1} \exp \left(\frac{V_f W}{Q} (x_i - x_{i-1}) \right) + \frac{(k_e + k_b) Q_i S}{V_f W} \left[1 - \exp \left(- \frac{V_f W}{Q} (x_i - x_{i-1}) \right) \right] \quad (20)$$

Последовательность расчетов

Исходные данные включают: начальный продольный профиль; распределение площадей водосбора по длине оврага; инженерно-геологическое строение толщ, прорезаемой оврагом (отметки подошв всех слоев, коэффициенты эродируемости для составляющих их грунтов, величины гидравлической крупности наносов, величины критических скоростей течения); число лет, на которое проводится прогноз; количество эпизодов стока в каждом году; модули стока воды для всех эпизодов стока и их продолжительность.

Первым выполняется цикл по годам, в котором учитывается многолетняя изменчивость стока воды. Затем выполняются циклы по количеству паводков в году и содержащихся в них эпизодов стока с учетом их продолжительности, которые задаются в исходных данных. Далее выполняется цикл расчета по длине оврага с шагом Δx . При этом для каждой точки вреза, исходя из ее положения относительно границ литологически однородных слоев грунта, назначаются величины коэффициента эродируемости, гидравлической крупности наносов и размывающей скорости. Вычисляются значения ширины, глубины и скорости потока и реализуется схема (17).

Одной из важнейших характеристик численного решения является его устойчивость. Необходимо выбрать такие значения величин шагов сетки по длине и по времени, чтобы выполнялось соотношение (18). Поэтому для всех точек продольного профиля определяется максимальное значение показателя $k_e q$ и при этом значении на каждом временном шаге решения задачи проверяется это соотношение. Если

$(k_e q)_{\max} \frac{\Delta t}{\Delta x} > 1$, то временной интервал необходимо уменьшить в M раз, так, чтобы соотношение (18) выполнялось. В этом случае расчет деформации продольного про-

филя выполняется M раз с одинаковыми гидрологическими характеристиками, но с уменьшенным шагом по времени.

Рассчитывается объем размыва-аккумуляции за паводок и за весь период деформаций. По формулам (12)–(15) производится расчет формы поперечного профиля оврага в виде трапеции, его глубины и ширины (по дну и по верху).

После завершения всех циклов выводится конечный продольный профиль оврага. Перечисленные процедуры реализованы в программном комплексе AUSGUL, который снабжен дружественным интерфейсом, облегчающим ввод исходной информации и анализ результатов.

Верификация динамической модели развития оврага

Верификация модели проведена на основе данных наблюдений за развитием оврага Брук Крик (бассейн р. Ясс, юго-восточная Австралия). Использованы планы 1838 и 1932 гг. лота 64 в местности Паррорумба, округ Муррей (получены от П. Фоггарт), аэрофотоснимки 1941, 1955, 1968, 1976 и 1988 гг., тахеометрическая съемка оврага 1992 г., а также проведены геолого-геоморфологические исследования. Водосбор оврага занимает площадь 2,54 км², он сложен аспидными сланцами, перекрытыми на склонах маломощными (0,5–1,0 м) средними и тяжелыми красновато-коричневыми суглинками. Эрозионное расчленение водосбора имеет длительную историю, последний этап глубокого вреза приходится на конец плейстоцена. В позднеледниковье и голоцене густая сеть эрозионных форм заполнялась склоновыми отложениями и во врезax мощность суглинков достигает 4–6 м. В голоцене заполнение врезov часто происходило в результате эрозии после пожаров, выявлены области аккумуляции насыщенных органикой суглинков с большим количеством углей с радиоуглеродным возрастом 2000–2500 лет (Р. Воссон, персональное сообщение).

К началу современного этапа врезания на месте древнего вреза существовала пологосклонная ложбина. Заложение оврага относится к самому началу освоения европейцами бассейна р. Ясс – на плане 1838 г. он уже имеет длину около 800 м (рис. 1а). К 1932 г. сформировались основные отвершки оврага, а к 1941 г. он приобрел

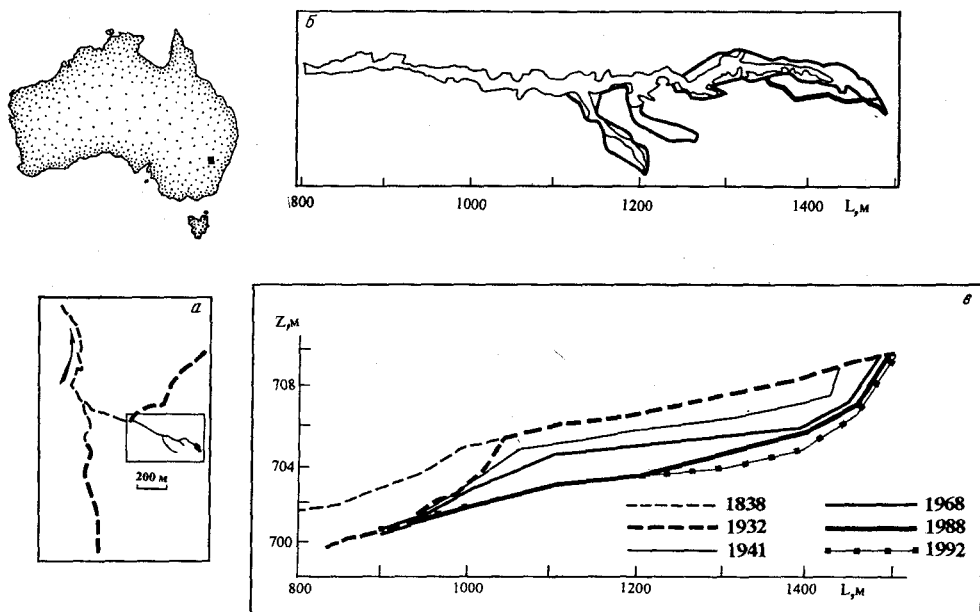


Рис. 1. Эволюция оврага Брук Крик в 1838–1992 гг. (а), удлинение (б) и углубление (в) его верхней части
 L – расстояние от устья по руслу оврага, Z – абс. отметки дна

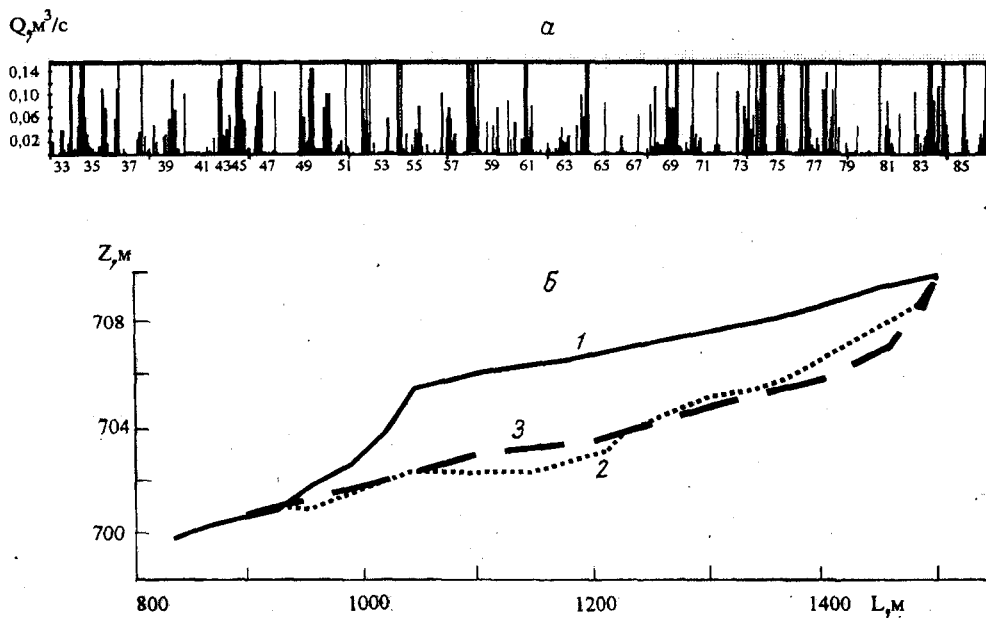


Рис. 2. Верификация динамической модели развития продольного профиля
 а – изменение во времени расхода воды в устье оврага Брук Крик, б – углубление оврага по отношению к 1932 г. (линия 1) в 1988 г. (2 – рассчитанное, 3 – фактическое)

очертания, близкие к современным, и длину основного русла 1440 м. После 1941 г. овраг удлинился только на 60 м (рис. 1б). На большей части длины оврага суглинки, заполняющие древнюю эрозионную форму, были прорезаны и днище оврага достигло сланцев.

Только на верхних 600-700 м овраг продолжает развиваться в суглинистой толще. Для этого участка фотограмметрическим путем восстановлены продольные профили днища оврага 1941, 1968 и 1988 годов (получены от К. Вильсон). Достаточная точность восстановления отметок дна подтверждается хорошим соответствием профиля 1988 г. и профиля 1992 г., полученного в ходе теодолитной съемки (рис. 1а). Эти профили были использованы для верификации динамической модели развития оврага для периода 1932–88 гг. Сток воды с бассейна оврага для этого периода был рассчитан по данным наблюдений за уровнями и расходами воды на станции Ясс, р. Ясс (рис. 2а). Коэффициент эродируемости для суглинков был определен по данным табл. 1 как $1,5 \cdot 10^{-3}$. Для его калибровки использовались также продольные профили 1941 и 1968 гг.

Расчеты показывают вполне удовлетворительную сходимость фактических и вычисленных отметок продольного профиля оврага Брук Крик (рис. 2б). Наименьшее соответствие вертикальных отметок получено для привершинной части оврага, процессы в которой во многом определялись стоком грунтовых вод из пруда, созданного выше оврага между 1932 и 1941 гг.

Заключение

Динамическая модель развития оврага описывает первую стадию быстрого изменения его морфологии. В период снеготаяния или дождевого паводка формируется прямоугольный врез. На этом этапе изменение отметок продольного профиля определяется интенсивностью взмыва частиц грунта со дна оврага и их аккумуляцией. Эти процессы описываются уравнением $\frac{\partial Z}{\partial t} - k_e U D \frac{\partial Z}{\partial x} - V_f C = 0$, которое числен-

но решается с помощью явной схемы типа Лакса-Вендрофа. В периоды между эпизодами стока поперечный профиль оврага трансформируется мелкими оползнями и приобретает трапецевидную форму шириной по дну W_b , глубиной

$$D_t = \left(\sqrt{W_b^2 + \frac{4V_0}{\operatorname{tg}(\phi)}} - W_b \right) \frac{\operatorname{tg}(\phi)}{2} \text{ и шириной в бровках } W_t = W_b + 2,0 D_t / [\operatorname{tg}(\phi)]. \text{ Численные}$$

эксперименты показывают применимость изложенной методики при условии аккуратного задания исходных данных и подбора необходимых эмпирических коэффициентов. Это в первую очередь касается коэффициента эродированности грунтов k_e , для определения значения которого необходимо знание инженерно-геологических характеристик грунтов, а для ответственных расчетов необходимо измерение этого коэффициента в натуральных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адерихина Л.А., Адерихин В.В. Потенциал роста оврагов в длину в условиях мелового юга Среднерусской возвышенности. // Восьмое межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Воронеж: 1993. С. 5–6.
2. Боголюбова И.В., Караушев А.В. Вопросы формирования и развития оврагов. // Тр. ГГИ. 1979. Вып. 267. С. 5–27.
3. Косов Б.Ф., Зорина Е.Ф., Любимов Б.П. и др. Овражная эрозия. М.: Изд-во МГУ, 1989. 168 с.
4. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1983. 218 с.
5. Sidorchuk A. Gully Erosion and Thermoerosion on the Yamal Peninsula. In: O. Slaymaker ed. "Geomorphologic Hazards". J. Wiley and Sons. 1996. P. 153–168.
6. Косов Б.Ф., Никольская И.И., Зорина Е.Ф. Экспериментальные исследования оврагообразования. // Экспериментальная геоморфология. Т. 3. 1978. М.: Изд-во МГУ, С. 113–140.
7. Schumm S.A., Harvey M.D., Watson C.C. Incised channels. Morphology, dynamics and control. Water. Res. Publ., 1984. 200 p.
8. Graham O.P. Land Degradation Survey of N.S.W. // Soil Conservation Service of N.S.W. Tech. Rep. 7, 1988. 47 p.
9. Сидорчук А.Ю. Эрозионно-аккумулятивные процессы на Русской равнине и проблемы заиления малых рек. // Труды Академии водохозяйственных наук. Вып. 1. Водохозяйственные проблемы русловедения. М.: 1995. С.74–83.
10. Рожков А.Г. Овражная эрозия и мелиорация заовраженных земель. // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 16–17.
11. Poesen J., Vandaele K., van Wesemael B. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: Walling D, Webb B. (ed). Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. IAHS Publ. N 236, 1996. P. 251–266.
12. Wasson R. (ed). Land Use and Climate Impact on Fluvial Systems during the Period of Agriculture. PAGES Workshop Report, ser. 96–2, 1996. 51 p.
13. Ingram J., Lee J., Valentine C. The GCTE Soil Erosion Networks: a multy-participatory research programm. // Journal of Soil and Water Conservation. V. 51. N 5. 1996. P. 377–380.
14. Макавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. Л.: Речиздат, 1940. 643 с.
15. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 216 с.
16. Einstein H.A. Formulas for the transportation of bed load. // Trans. Amer. Soc. Civil Eng. 107, 1942. P. 561–577.
17. Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
18. Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.

Московский государственный университет
Географический факультет

Поступила в редакцию
19.11.96

DYNAMIC MODEL OF GULLY EROSION

A.Yu. SIDORCHOUK

S u m m a r y

Model describes the quick growth of gully's length and depth. It is based on the equations of balance of silt load and deformation – for the description of transformation of longitudinal section of gully and on the equation of straight slope stability – for the cross-section changes. Model is verified by data of field measurements; it is represented as software algorithm AUSGUL.