



МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА МОРФОМЕТРИИ СТАБИЛЬНОГО ОВРАГА

Введение

Значимость овражной эрозии хорошо известна. Общий объем оврагов на Русской равнине составляет 4 млрд. м³ или 4% общего объема перемытых почв за последние 300 лет [1]. Овраги полностью разрушают плодородный почвенный слой, выводят из сельскохозяйственного использования окружающие овраг земли. По А.Г. Рожкову [2], площадь оврагов за сто лет интенсивного оврагообразования в России составила 6 млн. га, а площадь заовраженных земель, на которые овраги оказывают отрицательное влияние, – около 30 млн. га. На русской равнине ежегодно разрушается оврагами 45–90 тыс. га земель [3].

Развитие оврагов проходит в две основные стадии, при участии разных рельефообразующих процессов. На первой стадии преобладают размыв днища оврагов и относительно быстрая трансформация поперечного профиля оврага склоновыми процессами. На второй стадии продольный профиль оврага стабилизируется, здесь происходит транспорт наносов или слабая аккумуляция. Идет расширение днища оврага за счет боковой эрозии, и медленное перемещение грунтов на его откосах. За первую стадию развития оврага вырабатывается 80% его длины, 60% его площади и 35% объема [4]. Но продолжительность этой стадии составляет не более 5% общего периода развития оврага. На протяжении основного времени существования оврага его морфометрия близка к устойчивым характеристикам.

Две стадии развития оврага предполагают наличие двух моделей для описания его эволюции. Для первой стадии необходима динамическая модель, с помощью которой можно рассчитывать быстрые изменения отметок днища оврага, попятное продвижение его вершины [5 6]. В то же время для реализации противозэрозионных мероприятий часто достаточно знать конечные максимально возможные размеры оврага. В этом случае необходима модель морфометрии стабильного оврага, которую в дальнейшем будем называть статической моделью.

Главные допущения статической модели

Модель морфометрии стабильного оврага базируется на предположении неизменности во времени t отметок днища оврага Z и ширины его днища W_b .

$$\partial Z / \partial t = 0; \partial W_b / \partial t = 0. \quad (1)$$

Как следует из уравнения деформации

$$(1 - \epsilon) \partial Z / \partial t = -\partial q_s / \partial X,$$

для этого необходимо, чтобы удельный расход наносов q_s (с учетом пористости наносов ϵ) не изменялся по длине X : $\partial q_s / \partial X = 0$. Это критерий существования выработанного продольного профиля русла в понимании Н.И. Маккавеева [7] при всей условности этого понятия, на которую указывал Маккавеев. Выработанный продольный профиль русла (без учета геохимических и биохимических процессов) может существовать в двух случаях: 1) если скорость взыва наносов со дна равна интенсивности аккумуляции наносов; 2) если и взыв, и аккумуляция наносов в русле отсутствуют.

Первый случай обычно рассматривается при анализе выработанного продольного профиля дна активного речного потока [8–10]. Второе условие широко применяется при проектировании ирригационных каналов [11]. Оно может быть применено для расчета профиля стабильного оврага в связных грунтах, когда скорость потока U в овраге больше, чем критическая скорость V'_{cr} , при которой начинается осаждение частиц мелких наносов, смываемых с водосбора, и одновременно меньше критической скорости V''_{cr} начала размыва связных грунтов ложа оврага: $V'_{cr} < U < V''_{cr}$. На этом условии основаны методики расчета профиля устойчивого русла Ц.Е. Мирцхулава [12], морфометрии стабильного оврага Е.Ф. Зориной [13–15], Л.А. и В.В. Адериных [16]. Предлагаемый в настоящей статье вариант статической модели овражной эрозии является дальнейшим развитием модели Е.Ф. Зориной.

Основные компоненты модели Е.Ф. Зориной

Модель была разработана в конце 70-х гг. и в дальнейшем несколько модифицировалась [13–15, 17]. Для расчета критической скорости начала размыва используется формула Шези-Маннинга:

$$V'_{cr}{}^2 = \frac{SD^{4/3}}{n^2} \quad (2)$$

Она решается относительно уклона S , а глубина потока D частично через расход воды Q , скорость V'_{cr} и ширину потока W :

$$D = \frac{Q}{V'_{cr} W} \quad (3)$$

Тогда уклон днища стабильного оврага выразится формулой:

$$S = \frac{(V'_{cr})^{2,67} n^2 (W/D)^{0,67}}{Q^{0,67}} \quad (4)$$

Е.Ф. Зорина предполагает, что шероховатость ложа (коэффициент Маннинга n) и коэффициент формы потока W/D мало изменяются по длине оврага, и стабильный уклон контролируется в основном критической неразмывающей скоростью потока и критическим расходом воды. Формула (4) совместно с эмпирической связью уклона оврага в низовьях с его длиной L и глубиной базиса эрозии H использована для вывода формулы для расчета максимальной длины стабильного оврага L_m :

$$L_m = 0,28 \frac{HQ^{0,67}}{(V'_{cr})^{2,67} n^2 (W/D)^{0,67}}$$

Были также выведены полуэмпирические формулы для максимальной глубины овражного вреза, площади и объема оврага.

Принципиальное значение имеет назначение критического расхода воды. Е.Ф. Зорина предлагает использовать максимальный расход воды 1% обеспеченности. В случае вычисления максимальной длины оврага, на что и сориентирована методика, это вполне логичное предложение, так как меньшие расходы воды дают слишком малую длину стабильного оврага, а большие расходы имеют повторяемость меньше обычного времени существования оврагов.

Модификация методики Е.Ф. Зориной

Методика была модифицирована в нескольких направлениях: 1) предложено учитывать изменчивость относительной ширины потока при изменении расходов воды; 2) введены необходимые зависимости для расчета не только максимальной длины оврага, но и формы продольного профиля; 3) предложено учитывать все расходы воды, формирующие стабильный овраг; 4) разработан метод расчета поперечного профиля стабильного оврага; 5) методика реализована в виде программного комплекса для ЭВМ.

Форма продольного профиля стабильного оврага

Изменение относительной ширины потока при изменении расходов воды по длине потока обусловлено более быстрым увеличением ширины, чем глубины при увеличении расхода воды. В зависимости

$$W/D = aQ^b \quad (5)$$

показатель степени b больше нуля и, согласно Брею [18], равен 0,2

Формула (4) с учетом (5) записывается в виде:

$$S = KQ^{-m} \quad (6)$$

Здесь $K = a(V_{cr}')^{2,67} n^2$; $m = 0,67(1 - b)$. В случае изменения вдоль оврага литологии прорезаемой толщи K является функцией расстояния.

Применимость формулы типа (6) для описания устойчивых профилей эрозионных форм достаточно исследована. Эмпирические формулы, показывающие обратную зависимость между уклоном и расходом воды (или заменяющих его длиной русла и площадью водосбора) хорошо известны для речных русел, которые обычно находятся в состоянии динамической устойчивости [7, 19]. Имеются работы, в которых эта зависимость применена для овражных врезов [20], в том числе для разделения оврагов на активные и стабильные [21].

Так как расход воды в точке X является функцией длины линий тока (через связь с площадью водосбора) и модуля расхода M : $Q = Mf(X)$, то формула (6) переписывается в виде обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\frac{dZ}{dX} = -K(X)Mf^{-m}(X) \quad (7)$$

Оно легко решается при известных функциях $K(X)$ и $f(X)$, результатом решения является продольный профиль стабильного оврага при заданном критическом модуле стока воды. Вид функции $f(X)$ определяется формой овражного водосбора. Для некоторых форм простой геометрии эта функция может быть задана аналитически. В общем случае функция $f(X)$ задается в табличной форме. Функция $K(X)$ определяется литологией прорезаемой толщи и шероховатостью русла. Она претерпевает разрывы в точках смены литологии, ее также целесообразно задавать в виде таблицы. Так что обычно уравнение (7) решается численно.

При расчете формы продольного профиля нецелесообразно использовать только один расход воды малой обеспеченности. Время его прохождения недостаточно для

формирования стабильного выработанного продольного профиля, а объем стока – для выноса соответствующего количества наносов. Во флювиальной геоморфологии уже давно сложилось представление о том, что все расходы воды, проходящие по руслу, в той или иной степени производят русловые переформирования. Как отметил Н.И. Маккавеев [7], принято считать, что величина этих переформирований определяется величиной стока наносов $Q_{si}\Delta t_i$, переносимых при прохождении данного расхода воды Q_i за время его прохождения Δt_i . Исходя из этого принципа Н.И. Маккавеев разработал методику расчета руслоформирующего расхода воды [7]. Этот принцип был применен нами при расчете выработанного продольного профиля речного русла в условиях нижнего Терека [9], было получено близкое совпадение фактического выработанного и рассчитанного продольного профиля.

Применительно к расчету выработанного продольного профиля стабильного оврага с учетом всего диапазона формирующих его максимальных расходов воды необходима следующая последовательность вычислений:

- а) Весь диапазон максимальных годовых модулей стока воды разбивается на N интервалов.
- б) Для каждого модуля стока воды M_i , приходящегося на середину i -того интервала, рассчитывается (или берется измеренный) модуль расхода наносов M_{si} (отнесенный ко всей площади водосбора оврага) и повторяемость P_i модулей стока из данного интервала.
- в) По формуле (7) вычисляются отметки стабильного профиля оврага Z_{ij} для каждого i -того модуля стока воды.
- г) Производится осреднение с весом каждой группы из N отметок продольного профиля Z_{ij} , которые относятся к точке продольного профиля X_j . В качестве весовой функции используется произведение $M_{si}P_i$:

$$Z_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_{ij} M_{si} P_i}{\sum_{i=1}^N M_{si} P_i} \quad (8)$$

В качестве минимальной целесообразно назначать повторяемость максимальных модулей стока воды раз в 100–200 лет, исходя из обычной продолжительности формирования стабильных оврагов.

На рис. 1 показан пример подобного осреднения для продольного профиля оврага Уайтхэд Крик, у г. Голбурн в юго-восточной Австралии. Этот овраг развивается более 150 лет и в основном выработал свой продольный профиль. Рассчитанный продольный профиль, осредненный по формуле (8), удовлетворительно совпадает с измеренным. В то же время ни один из продольных профилей, рассчитанных с использованием частных модулей стока, не может адекватно описать эту форму. В нижней части продольного профиля основное значение для его формирования имеют расходы малой величины и большой повторяемости. Верхняя часть выработанного продольного профиля формируется исключительно большими расходами малой повторяемости.

Форма поперечного профиля стабильного оврага

Уклон бортов стабильного оврага ϕ можно рассчитывать по условию устойчивости склона при плоском оползании:

$$\frac{C_h}{g^* \rho_s^* D_t} = \frac{\rho_s - w^* \rho}{\rho} \tan(\varphi)^* \cos^2(\phi) - \frac{\sin(2\phi)}{2} \quad (9)$$

Здесь C_h – связность грунтов, φ – угол внутреннего трения, D_t – глубина овражного вреза, w – объемная влажность грунта, ρ_s и ρ – плотность грунта и воды, g – ускорение свободного падения.

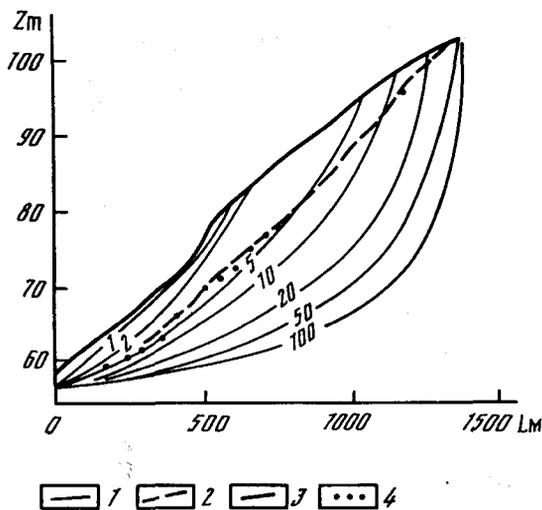


Рис. 1. Расчет стабильных продольных профилей дна оврага Уайтхэд Крик

1 – профили при расходах повторяемостью раз в 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 лет; 2 – профиль при осреднении по формуле (8); 3 – начальный профиль склона; 4 – фактический продольный профиль оврага

Ширина устойчивого днища оврага, по аналогии с шириной речного русла, может быть представлена, как функция расхода воды:

$$W_b = pQ^q \tag{10}$$

Коэффициент p обычно около 10,0; показатель степени q обычно 0,4–0,5.

Тогда форма поперечного профиля стабильного оврага опишется трапецией с высотой D_r , шириной по дну W_b и шириной поверху $W_t = W_b + 2,0D_r / [\tan(\varphi)]$.

Реализация расчетной схемы формирования стабильного оврага

Изложенная методика была реализована в виде программного комплекса STGUL. Исходная информация вводится в интерактивном режиме с помощью дружественного меню в следующей последовательности:

1) Название оврага; площадь водосбора; длина водосбора; отметка устья оврага; количество литологических однородных слоев грунта, прорезаемых оврагом; максимальные годовые модули стока воды с повторяемостью раз в 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 100 лет.

2) Форма водосбора в плане (по предлагаемому списку); или формула зависимости площади водосбора F от расстояния от устья оврага X ; или таблица с этой зависимостью.

3) Продольный профиль начального склона в виде таблицы $Z - X$.

Далее для каждого литологически однородного слоя вводятся следующие характеристики:

4) Критическая скорость начала размыва выбирается по списку на основании литологии грунта или рассчитывается по формуле Мирцхулава [12]. Возможно также подобрать значение критической скорости (при прочих известных параметрах) на основании морфометрии стабильного участка продольного профиля.

5) Коэффициент шероховатости Маннинга выбирается по списку на основании литологии грунта или рассчитывается по формуле Шези-Маннинга.

6) Коэффициент a и показатель степени b в зависимости (5) формы живого сечения потока от расхода воды.

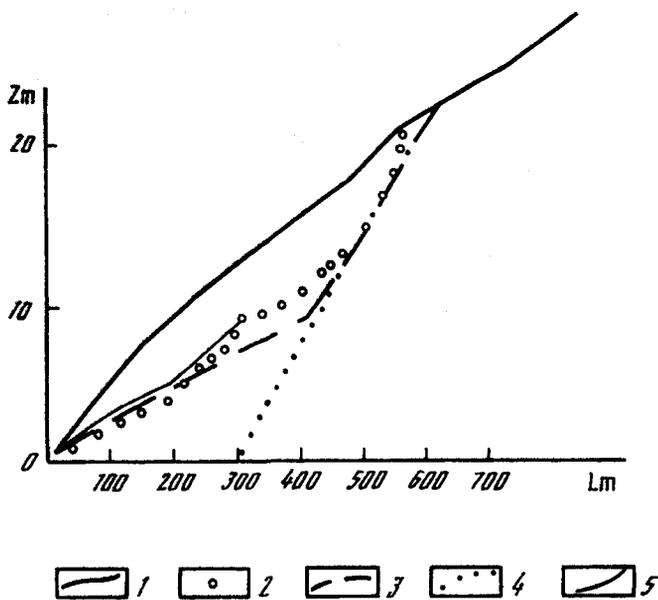


Рис. 2. Стабильный продольный профиль оврага Кипит

1 – начальный продольный профиль склона; 2 – отметки современного продольного профиля дна оврага;

3 – рассчитанный стабильный продольный профиль; 4 – кровля сланцев; 5 – терраса

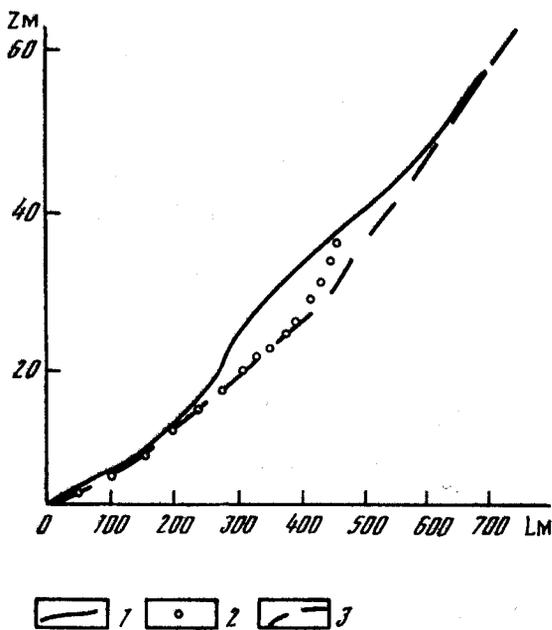


Рис. 3. Стабильный продольный профиль оврага Снейк

1 – начальный продольный профиль склона; 2 – отметки современного продольного профиля дна оврага;

3 – рассчитанный стабильный продольный профиль

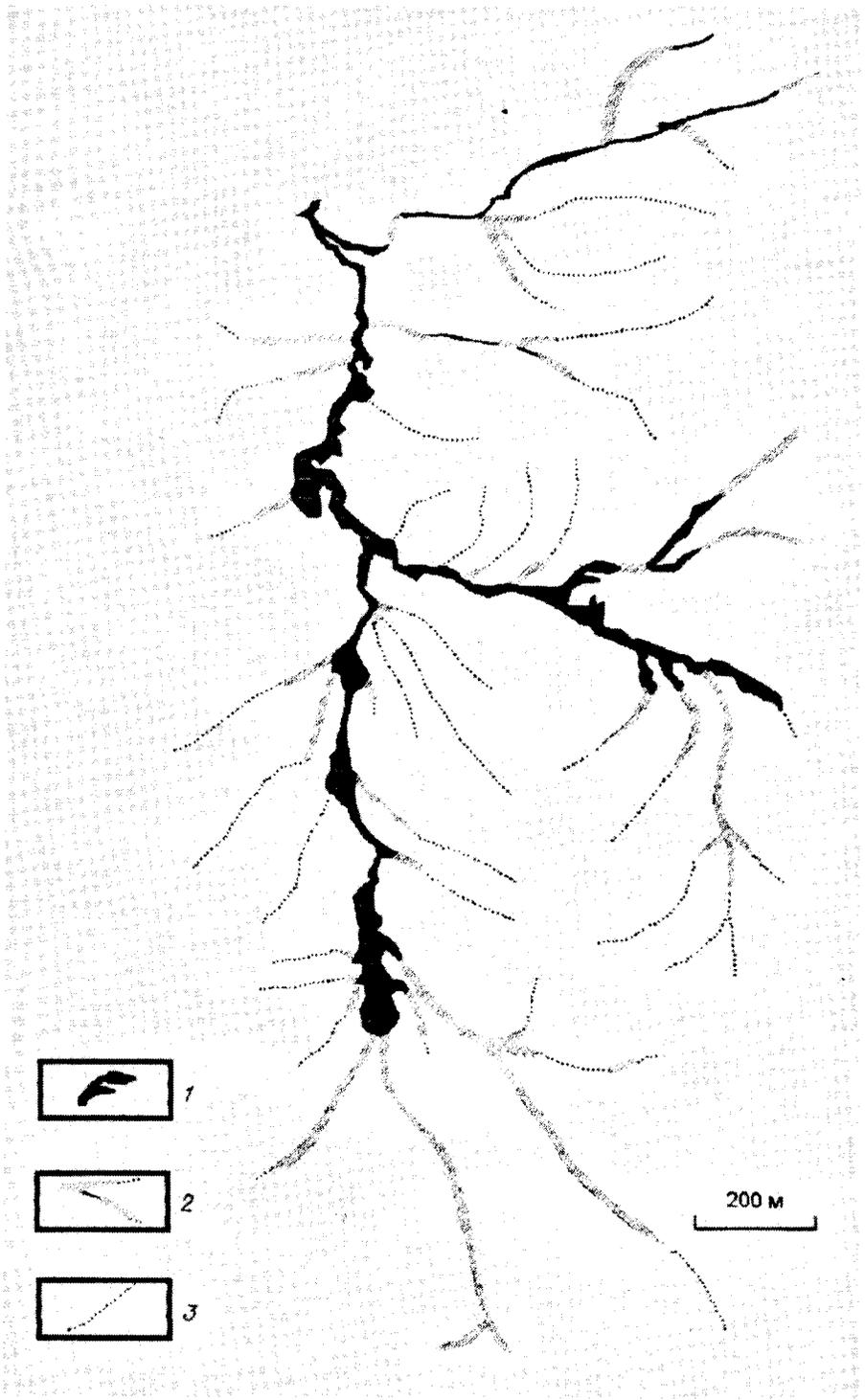


Рис. 4. Потенциал овражной эрозии на водосборе Брук Крик

1 – существующий овражный врез; 2 – вероятный врез при полном развитии системы; 3 – ложбины на водосборе

7) Угол устойчивого откоса; или связность, плотность, угол внутреннего трения, влажность грунта для расчета устойчивого откоса по формуле (9).

8) Коэффициент p и показатель степени q в зависимости (10) ширины стабильного днища от расхода воды.

Все исходные данные могут быть заранее подготовлены в виде отдельных файлов.

После ввода исходной информации производится расчет и на экран выводится график продольного профиля стабильного оврага, а в виде отдельного файла получается таблица отметок дна, глубин, ширин, удельных объемов по длине оврага, а также общая длина, площадь и объем стабильного оврага.

Примеры расчета продольных профилей стабильных оврагов

Для сравнения рассчитанных и фактических продольных профилей стабильных оврагов было обследовано несколько оврагов на юго-востоке Австралии. Эта территория подверглась интенсивной овражной эрозии после 1810–50 гг., когда европейские переселенцы активно вырубали эвкалиптовые леса и использовали земли под пашню и пастбища. В юго-восточной Австралии объем овражной эрозии составляет 37% от общего объема перемытых почв [22], что связано с использованием земель в основном в качестве пастбищ. К настоящему времени большинство оврагов выработали стабильный продольный профиль, во всяком случае на нижних участках, достигли максимальной длины и медленно расширяются за счет выполаживания склонов.

Овраг Кипит у г. Ганнада (Новый Южный Уэльс) имеет длину 500 м при длине водосбора 1500 м и его площади 46 га. На протяжении 450 м овраг врезан в бурые суглинки, на коротком верхнем участке – в черные сланцы (рис. 2). Продольный профиль в суглинках находится в состоянии динамической устойчивости. До 1920–25 гг. его отметки были близки к современным. В 30-е годы на дне оврага произошла аккумуляция мощностью до 1,5 м. Время этой аккумуляции фиксируется многочисленными пивными бутылками с датами выпуска на донышках, разбросанными по всей толще аккумуляции. В дальнейшем эта толща была прорезана и в 1992 г. отметки продольного профиля были уже несколько ниже отметок 20-х гг. Неразрывающая скорость V_{cr}' Для суглинков была определена обратным расчетом по морфологии профиля на нижних 100 м оврага. Она составила 1,5 м/с. Для сланцев неразрывающая скорость рассчитана тем же способом по верхней части профиля, она равна 2,7 м/с. Рассчитанный стабильный продольный профиль близок к фактическому, однако возможно продолжение врезания в суглинки в средней части оврага. Конечная длина стабильного оврага Кипит может достигнуть 800 м, его объем – 95440 м³.

Водосбор оврага Снейк (бассейн реки Сноуи, Новый Южный Уэльс) имеет площадь 11,8 га и общую длину 800 м. Сложен сильно выветренными гранитами, на верхних нескольких метрах профиль выветривания образован сцементированной дресвой. Современный овраг расположен на выпуклом деллювиально-коллювиальном шлейфе (рис. 3). Нижняя часть вреза представляет собой балку с устойчивым днищем и пологими заросшими бортами. Этот участок был использован для калибровки неразрывающей скорости V_{cr}' , она составила 1,8 м/с. Это значение было использовано для расчета стабильного продольного профиля оврага. Его длина может составить 730 м, объем – 27790 м³.

Овраг Брук Крик имеет длину по основному руслу около 1500 м, площадь водосбора 206 га. По основному руслу практически полностью выработан стабильный продольный профиль в сланцах и суглинках. Для последних с помощью процедуры калибровки подобрано значение критической скорости $V_{cr}' = 1,4$ м/с. Для всех выраженных в рельефе ложбин на водосборе этого оврага были рассчитаны стабильные отметки дна, глубины, ширины и объемы вреза. Тем самым получена карта потенциала овражной эрозии на водосборе оврага Брук Крик (рис. 4). Далек не все лож-

бины на водосборе могут переформироваться в овраги, однако из общей потенциальной длины оврагов на этом водосборе в 9,9 км в настоящее время выработано только 4,1 км (41%).

Заключение

Расчитанные и фактические продольные профили для стабильных оврагов юго-восточной Австралии достаточно близко совпадают, что свидетельствует о применимости предложенной схемы расчета. В то же время отдельные положения методики требуют дальнейшего уточнения. Коэффициенты a и показатели степени b в зависимости (5) формы живого сечения потока от расхода воды несомненно различны для разных литологических условий врезания оврага. В настоящее время эти значения установлены для весьма ограниченного класса грунтов, в основном несвязных. Эта зависимость характеризуется разными коэффициентами при изменении морфометрии потока по длине русла, и при изменении уровня воды в одном створе. Последнее обстоятельство требует своего учета в методике. На малом количестве натурального материала получены коэффициенты p и показатели степени q в зависимости (10) ширины стабильного днища от расхода воды. Они также контролируются литологией прорезаемой оврагом толщи. Коэффициент шероховатости n обычно изменяется с изменением уровня воды в русле, это также должно найти отражение в методике.

Наиболее уязвимым местом во всех методах расчета выработанного профиля русла является необходимость выбора одного или нескольких формирующих расходов воды. Правильность выбора может быть обоснована только массовым сравнением расчитанных и фактических выработанных профилей русла, для чего обычно нет достаточного количества наблюдений.

Эти и другие недостатки предложенной методики во многом сглаживаются процедурой калибровки величины критической скорости потока для каждого конкретного оврага по морфометрии устойчивого участка его продольного профиля при прочих заданных параметрах расчета. Такая калибровка применима к широкому списку объектов, так как у многих оврагов в низовьях уже имеется участок русла со стабильной морфометрией. Калибровка существенно уменьшает влияние на результаты расчета как ошибок при назначении расчетных параметров, так и неточностей, заложенных в основных предпосылках методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорчук А.Ю. Эрозионно-аккумулятивные процессы на Русской равнине и проблемы заиления малых рек // Тр. Академии водохозяйственных наук. Вып. 1. Водохозяйственные проблемы русловедения. М., 1995. С. 74–83.
2. 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.
3. Волощук М.Д. Теоретические и практические основы восстановления почв, пораженных эрозией // Закономерности появления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 19–20.
4. Косов Б.Ф., Никольская И.И., Зорина Е.Ф. Экспериментальные исследования оврагообразования // Экспериментальная геоморфология. Т. 3. 1978. М.: Изд-во МГУ, С. 113–140.
5. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1983. 218 с.
6. Sidorchuk A. Gully Erosion and Thermoerosion on the Yamal Peninsula // O. Slaymaker ed. Geomorphic Hazards, Chichester: J. Wiley and Sons, 1996. P. 153–168.
7. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
8. Алексеевский Н.И., Михайлов В.Н., Сидорчук А.Ю. Гидролого-морфометрическое обоснование оптимального регулирования русла в низовьях р. Терек // Вестник МГУ. Сер. 5, География. 1985. № 4. С. 99–105.
9. Сидорчук А.Ю. Прогнозирование и предупреждение затоплений сельскохозяйственных земель паводковыми водами // Актуальные вопросы эрозиоведения. М.: Колос, 1984. С. 207–222.

10. Чалов Р.С. Выработанный продольный профиль и направленные вертикальные деформации речных русел // Геоморфология. 1995. № 3. С. 18–24.
11. Замарин Е.А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах. М.: Гострансиздат, 1951. 70 с.
12. Миртицхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 303 с.
13. Зорина Е.Ф. Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 81–89.
14. Зорина Е.Ф. Прогноз количества и длины оврагов в пределах балочного водосбора // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 80–91.
15. Косов Б.Ф., Белова Е.М., Зорина Е.Ф. и др. Опыт оценки потенциала роста оврагов в Европейской части СССР // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 6. М.: Изд-во МГУ, 1977. С. 43–54.
16. 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.
17. Овражная эрозия. М.: Изд-во МГУ, 1989. 168 с.
18. Bray D.I. Regime equations for gravel-bed rivers // D.R. Hey et al. (ed.). Gravel-bed rivers. Chichester, J. Wiley and Sons Ltd., 1982. P. 520–542.
19. Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. Fluvial processes in geomorphology. San Francisco: Freeman, 1964. 522 p.
20. Schumm S.A., Harvey M.D., Watson C.C. Incised channels. Morphology, dynamics and control. Water-Res. Publ., 1984. 200 p.
21. Nanson G.C., Erskine W.D. Episodic changes of channels and floodplains on coastal rivers in New South Wales // Fluvial geomorphology of Australia, Sydney: Acad. Press, 1988. P. 201–208.

Московский государственный университет
 Географический факультет

Поступила в редакцию
 07.05.96

MODEL FOR CALCULATION OF STABILIZED GULLY MORPHOLOGY

A.Yu. SIDORCHOUCK

S u m m a r y

For taking erosion-control measures the maximum final size of gully is important. Static model for calculating the longitudinal and transversal profiles is proposed. Gully is supposed to be stable, formed in cohesive ground; the stream velocity – to be higher then critical one, at which accumulation of little particles begins, and at the same time to be lower than the scouring rate. In the model the whole range of water discharge is taken into account. The corresponding computer program has been compiled.