

А.Ю. Сидорчук

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ ¹

Введение

Потенциал развития овражной сети – максимально возможные длины и ширины оврагов в данных климатических и ландшафтных условиях. К решению проблемы оценки овражного потенциала существует два главных подхода. Первый подход был предложен П.С. Паттоном и С.А. Шаммом [Patton, Schumm, 1975]. Это поиск точки на склоне с условиями для начала эрозии, где скорость потока равна неразмывающей, где сочетаются критический уклон склона водосбора и критическая площадь водосбора. В этой точке расположена вершина оврага. Назовем это оценкой потенциала овражной эрозии «сверху». При такой оценке не учитываются изменение рельефа территории в ходе овражной эрозии и гравитационные процессы на бортах оврагов.

Е.Ф. Зорина [1979] так сформулировала второй подход: рассчитать форму продольного профиля оврага и найти ту точку, где эта кривая пересекает линию склона водосбора; расстояние от устья оврага до этой точки и будет максимально возможной длиной оврага. Назовем это оценкой потенциала овражной эрозии «снизу». В рамках этого подхода учитываются обратные связи в процессах овражной эрозии, в ходе которых меняются начальные условия для возникновения эрозии.

В предлагаемой статье рассмотрен комплекс математических моделей для расчета овражной эрозии. Две модели реализуют первый подход:

- экспресс-метод оценки риска овражной эрозии GER;
- модель расчета овражного потенциала, формируемого всем эрозионно опасным стоком TGEV.

В других двух моделях реализован второй подход:

- модель стабильного оврага STABGUL;
- динамическая модель эрозии и термоэрозии GULTEM.

Расчеты потенциала овражной эрозии «сверху»

Большинство существующих методов расчета овражной эрозии базируются на представлениях о критических условиях начала эрозии: если на склоне скорость линейного потока не меньше критической для начала размыва:

$$U \geq U_{cr}, \quad (1)$$

¹ Выполнено по плану НИР (ГЗ) Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева.

происходит линейная эрозия. В противном случае:

$$U < U_{cr} \quad (2)$$

склон остается стабильным.

Запишем критическую скорость потока U_{cr} через уклон S , глубину d и коэффициент шероховатости n по формуле Шези – Маннинга:

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n} d^{2/3}. \quad (3)$$

Если с помощью гидравлико-морфометрической зависимости заменить в (3) глубину потока показательной функцией от расхода воды Q (т. е. произведения слоя стока M на площадь водосбора F в данной точке $Q = kMF$):

$$d = pQ^m, \quad (4)$$

то получим:

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n} (pQ^m)^{2/3} = \frac{\sqrt{S}}{n} p^{2/3} (kMF)^{2m/3}. \quad (5)$$

Здесь $k = 1/86400000$ – переходный коэффициент от размерности расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$) к размерности слоя стока (мм) при расчете площади водосбора в м^2 .

Формула (5) часто записывается в виде обратной зависимости между уклоном свободной поверхности потока в русле S и площадью водосбора в этой точке F :

$$S = aF^{-b}. \quad (6)$$

Формулу (6) (используя расход воды Q , а не площадь водосбора F) впервые получил Н.И. Маккавеев (1955) из формулы Шези при некоторых гипотезах о виде коэффициентов a и b . В дальнейшем эта формула меняла свой вид без изменения физической сути. Так, П.С. Паттон и С.А. Шамм [Patton, Schumm, 1975] записывали ее как произведение критического уклона на критическую площадь водосбора:

$$a = SF^b. \quad (7)$$

Д.Р. Монтгомери и В.Е. Дитрих [Montgomery, Dietrich, 1994] использовали формулу:

$$a_m S^{-\alpha} = F. \quad (8)$$

Очевидно, что эти формулы несут одинаковую информацию, так как $\alpha = 1/b$ и $a_m = a^{1/b}$.

Формулы (6–8) часто используются в приложениях, значения коэффициентов a и b определялись для разных условий и регионов (см., например, обзор Д. Торри и Ж. Пусена [Torri, Poesen, 2013]). Однако эти формулы и коэффициенты представляют собой эмпирические представления формулы (5) и входящих в нее параметров. Так, коэффициент a в формулах (6) и (7) равен:

$$a = \frac{(nU)^2}{p^{4/3} (kM)^{4m/3}}, \quad (9)$$

а показатель степени b есть:

$$b = \frac{4m}{3}. \quad (10)$$

Как основная формула (5), так и ее эмпирические модификации (6–8) заключают в себе неопределенность. Для расчетов скорости потока по формуле (5) необходимо знать коэффициенты n , p , t и задаться величиной слоя стока M . Последняя величина имеет некоторую статистическую характеристику (повторяемость, обеспеченность, продолжительность), так что оценка овражного потенциала для заданной величины слоя стока M приобретает вероятностное значение. Для выбора этой расчетной величины имеются некоторые предположения: Е.Ф. Зорина [1979] рекомендует использовать максимальный расход воды (слой стока). Н.И. Маккавеев [1955] и М. Вольман и Д. Миллер [Wolman, Miller, 1960] полагают, что все расходы воды, проходящей по водосбору, участвуют в руслообразовании. Для того чтобы избавиться от этой неопределенности, достаточно решить формулу (5) относительно слоя стока:

$$M_{cr} = \left(\frac{nU_{cr}}{\sqrt{S_{cr}} p^{2/3}} \right)^{3/2m} (kF)_{cr}^{-1}. \quad (11)$$

Суть этой формулы такая же, что и у формулы (5). Если в данной точке водосбора с некоторыми уклоном и площадью фактический слой стока больше или равен критической величине, рассчитанной по формуле (11), т. е. $M \geq M_{cr}$, в этой точке потенциально возможно развитие эрозии.

Экспресс-метод оценки риска овражной эрозии GER

Если рассчитанное критическое значение слоя стока M_{cr} меньше, чем наблюдаемый слой стока, то в данном пункте на водосборе возможен линейный размыв со скоростью E . Размыв будет тем существеннее, чем больше будет эпизодов стока со слоем стока больше критического, то есть чем больше разность между максимальной для данной территории величиной скорости размыва E_{max} и скоростью размыва при критическом слое стока E_{cr} . Эту разность в данном пункте, приведенную к E_{max} , назовем локальным риском овражной эрозии R_U .

$$R_U = \frac{E_{max} - E_{cr}}{E_{max}}. \quad (12)$$

Отношение числа расчетных пунктов (пикселей) с положительной величиной эрозии $N_{R_U > 0}$ к общему числу N расчетных пунктов (пикселей) будет эрозионным риском R для территории.

$$R = \frac{N_{R_U > 0}}{N}. \quad (13)$$

Из экспериментов известно, что скорость размыва грунта можно записать как степенную функцию от скорости потока:

$$E \sim U^n. \quad (14)$$

Показатель степени n обычно близок к 3 [Ларионов, Добровольская и др., 2000]; тогда формулу (14) можно записать в виде (Сидорчук, 1998б):

$$E = Hk_E qS. \quad (15)$$

Здесь H – число, равное 1 при $U \geq U_{cr}$ и 0 при $U < U_{cr}$, k_E – эрозионный коэффициент, q – удельный расход Q/W . Ширину потока с помощью гидравлично-морфометрической зависимости можно заменить показательной функцией от расхода воды Q (т. е. произведения слоя стока M на площадь водосбора F в данной точке $Q = kMF$):

$$W = pw(kMF)^{mw}. \quad (16)$$

Тогда формула (15) примет вид:

$$E = Hk_E \frac{Q}{W} S = \frac{Hk_E S}{pw} (kMF)^{l-mw}, \quad (17)$$

а формула (12):

$$R_U = \frac{E_{max} - E_{cr}}{E_{max}} = \frac{(M_{max}^{l-mw} - M_{cr}^{l-mw})}{M_{max}^{l-mw}}. \quad (18)$$

Формула (18) отличается от предложенной в [Сидорчук, 2021] показателями степени, но имеет более обоснованный физический смысл и дает несколько большие величины локального риска вражней эрозии.

Расчеты риска вражней эрозии с помощью модели GER проведены для одного из участков Бованенковского газово-конденсатного месторождения. Это – водосбор балки площадью 1,14 км², с естественными и техногенными врагами, на котором расположен поселок Передвижная база бурения (ПББ). Здесь в 1990–1997 гг. были проведены измерения стока воды, морфометрических характеристик склоновых потоков и темпов эрозии [Бобровицкая, Баранов и др., 1999; Sidorchuk, 2015]. Исходя из этих исследований, параметры в формулах (11) и (16) имеют значения: $mw = 0,4$; $m = 0,3$; $p = 0,21$; $n = 0,06$; $M_{max} = 62$ мм (раз в 100 лет). В результате формула (11) приобретает вид (при площади водосбора в м² и слое стока в мм):

$$M_{cr} = \frac{12241U_{cr}^5}{S^{2.5}F^3}, \quad (19)$$

а формула (18):

$$R_U = 1 - \frac{23.8U_{cr}^3}{S_{cr}^{1.5}F_{cr}^{0.6}} \quad (20)$$

Критическая скорость начала размыва для выбранного участка устанавливалась в ходе полевых экспериментов для разных литологических разностей грунтов и состояния растительного покрова, в первую очередь объема подземной биомассы в поверхностном слое грунта [Sidorchuk, Grigor'ev, 1998]. Контрольные расчеты проведены для значений $U_{cr} = 0,2$ м/с (суглинистые грунты с полностью нарушенным растительным покровом) и $U_{cr} = 0,5$ м/с (суглинистые грунты под естественным мелкокустарничковым растительным покровом).

Исходные морфометрические данные получены с помощью модулей географической информационной системы QGIS с ГИС SAGA [QGIS..., 2019]. Цифровая модель рельефа извлечена из большой цифровой модели рельефа Арктики ArcticDEM [2018]. После процедуры заполнения замкнутых котловин площади водосборов рассчитываются в модуле ГИС SAGA TerrainAnalysis – Hydrology – Catchmentarea, а уклоны – TerrainAnalysis – Morphometry – Slope, aspect, curvature – 9 parameter 2ndorderpolynom. Сходные с использованными для расчетов модули входят в любую географическую информационную систему, так что экспресс-метод может быть реализован в любой удобной для пользователя оболочке.

Значение $U_{cr} = 0,2$ м/с соответствует суглинистым грунтам с полностью нарушенным растительным покровом. Такие условия характерны для тех участков водосбора балки, где произошло нарушение растительного покрова как при техногенном воздействии (при строительстве и движении транспорта), так и в результате естественных склоновых процессов – быстрых сплывов. Таким образом, реализован максимально возможный потенциал (риск) процессов линейного размыва для данного водосбора. Его значение R составляет 0,07. Уровень овражного потенциала R_U максимален на крутых склонах балки и речной долины, в вершинах большинства оврагов. На этих же участках максимальна вероятность схождения быстрых сплывов [Воскресенский, 2001], так что принятое значение $U_{cr} = 0,2$ м/с полностью соответствует реальной обстановке.

Значение $U_{cr} = 0,5$ м/с соответствует суглинистым грунтам с ненарушенным растительным покровом. Это идеальные условия, которые не реализуются даже при полном отсутствии техногенного воздействия на ландшафт из-за естественных процессов нарушения растительного покрова. В этих условиях значение R составляет 0,003. Тем не менее в пределах основных эрозионных форм – в балке и в части оврагов, имеются участки с положительным овражным потенциалом.

Модель расчета овражного потенциала, формируемого всем эрозионно опасным стоком TGEV

Формула (18) не содержит прямой информации об интенсивности размыва, хотя разность максимальной и критической скоростей эрозии связана с этой интенсивностью. Тем не менее целесообразно получить такой метод расчета овражного потенциала, в котором сочетались бы учет величины и продолжительности стока и эрозии. Основу для разработки такого метода находим у Н.И. Маккавеева [1955], который предложил метод определения руслоформирующего расхода воды на основе анализа произведения величин и повторяемостей расходов воды, максимум которого соответствует наибольшему стоку наносов. При овражной эрозии сток наносов формируется в основном в ходе самой эрозии. Тогда, при использовании метода Н.И. Маккавеева [1955], величина овражной эрозии и сток наносов Q_s за интервал времени dt составит:

$$dQ_s = E dt, \quad (21)$$

а суммарная эрозия и сток наносов за период времени прохождения стока воды больше критического:

$$Q_s = \int_{T_0}^T E dt. \quad (22)$$

Здесь T – общее время стока воды, T_0 – время начала стока больше критического, когда начинается эрозия. По аналогии с формулами (12) и (18) эту суммарную эрозию можно отнести к максимально возможной, когда эрозионно опасным является весь сток воды, а время заменить на продолжительность стока P (в долях от единицы):

$$R_p = \frac{\int_{T_0}^T E dt}{\int_0^T E dt} = \frac{\int_{P_{cr}}^1 M^{1-mw} dP}{\int_0^1 M^{1-mw} dP} = \frac{\int_0^1 M^{1-mw} dP - \int_0^{P_{cr}} M^{1-mw} dP}{\int_0^1 M^{1-mw} dP}. \quad (23)$$

Формула (23) позволяет рассчитать потенциал овражной эрозии, который определяется всем диапазоном эрозионно опасных расходов воды. Если функцию продолжительности стока воды задать в форме таблицы, записать формулу (23) можно в следующем виде:

$$R_p = \frac{\Delta P_1 \sum_{i=1}^{N-1} M_{i+1/2}^{1-mw} - \Delta P_2 \sum_{i=1}^{n-1} M_{i+1/2}^{1-mw}}{\Delta P_1 \sum_{i=1}^{N-1} M_{i+1/2}^{1-mw}}. \quad (24)$$

Тогда последовательность вычислений будет следующей:

- а) для каждой точки на водосборе вычисляется критический слой стока M_{cr} по формуле (11) и соответствующая ему продолжительность P_{cr} в долях единицы;
- б) в диапазоне значений слоев стока воды выделяется часть со стоком менее критического;

- в) эта часть разбивается на n интервалов с равными приращениями продолжительности ΔP_2 ; весь диапазон значений слоев стока на N интервалов с равными приращениями продолжительности ΔP_1 ;
- г) находятся значения $i + 1/2$ -х слоев стока воды $M_{i+1/2}$, приходящихся на середины i -х интервалов;
- д) по уравнению (24) вычисляется приведенный потенциал овражной эрозии, который определяется всем диапазоном эрозионно опасных расходов воды.

Функцию продолжительности стока воды можно задать в аналитической форме. Так, данные по полуострову Ямал показывают [Matveeva, Sidorchuk, 2020], что продолжительность P слоя стока M можно описать экспоненциальной функцией:

$$P = \exp(-B_N M). \quad (25)$$

Повторяемость слоя стока M получается дифференцированием величины $(1-P)$ из формулы (25):

$$dP/dM = B_N \exp(-B_N M). \quad (26)$$

Тогда формула (23) принимает вид:

$$R_p = \frac{\int_{M_{cr}}^{M_{max}} M^{1-mw} \exp(-B_N M) dM}{\int_0^{M_{max}} M^{1-mw} \exp(-B_N M) dM} = \frac{\int_0^{M_{max}} M^{1-mw} \exp(-B_N M) dM - \int_0^{M_{cr}} M^{1-mw} \exp(-B_N M) dM}{\int_0^{M_{max}} M^{1-mw} \exp(-B_N M) dM}. \quad (27)$$

Интегралы такого вида приводят к нижним неполным гамма-функциям:

$$\gamma(s, v) = \int_0^v t^{s-1} \exp(-t) dt. \quad (28)$$

Тогда формула (27) приобретает вид:

$$R_p = 1 - \frac{\gamma(2-mw; B_N M_{cr})}{\gamma(2-mw; B_N M_{max})}. \quad (29)$$

Исходные топографические данные для расчетов с помощью модели TGEV те же, что при использовании модели GER. Пример расчета можно найти в [Sidorchuk, 2020]. Структура формул (24), (27) и (29) такая же, что и у формул (12) и (18), а также как у формулы для риска овражной эрозии, предложенной в [Сидорчук, 2021]. Однако формулы (27) и (29) учитывают вид функции продолжительности стока воды через параметр B_N . Расчеты показывают, что формула (18) дает близкие значения потенциала (риска) овражной эрозии к полученным по формуле (29) при $B_N = 0,02-0,03$. При больших значениях B_N расчеты по формуле (18) завышают риски овражной эрозии по сравнению с расчетами по (29). Тем не менее все формулы этого типа одинаково разделяют водосбор на подверженный (в разной степени) и не подверженный овражной эрозии.

Расчеты потенциала овражной эрозии «снизу»

К этой категории относятся две модели: модель стабильного оврага STABGUL и динамическая модель эрозии и термоэрозии GULTEM. При использовании этих моделей рассчитывается продольный профиль оврага вверх по линии тока начиная от устья. Все модели включают возможность расчета поперечного профиля оврага по модели прямолинейного стабильного склона.

Модель стабильного оврага STABGUL

Е.Ф. Зорина (1979) использовала обратную зависимость между расходом воды и уклоном (6) для построения выработанного продольного профиля оврага. После некоторых предположений о конфигурации водосбора ею была получена формула для определения точки пересечения профилем начального склона, т. е. для расчета максимальной длины стабильного оврага L_m :

$$L_m = 0.28 \left(\frac{d}{W}\right)^{0.67} \frac{HQ^{0.67}}{n^2 U_{cr}^{2.67}} \quad (30)$$

(здесь H – глубина базиса эрозии, остальные обозначения прежние). Формула (30) приобрела большую популярность. Кроме фиксированной формы склона водосбора, в этой формуле предполагается использование одного формирующего расхода воды (среднемаксимального), а также неизменных по длине оврага относительной глубины потока, шероховатости ложа и величины неразмывающей скорости.

Модели выработанного продольного профиля оврага предлагались различными исследователями [Мирицхулава, 1988, Адерикина, Адерикин, 1993]. Главным предположением является то, что наступила такая стадия развития оврага, когда дно его уже не размывается. Это происходит в условиях равенства величин скоростей потока U в овраге критическим неразмывающим скоростям для грунтов, слагающих днище оврага, U_{cr} . Такая модель не учитывает начальные условия на склоне водосбора, в первую очередь устойчивость к размыву верхнего слоя почвогрунтов, насыщенного корнями растений. Этот недостаток модели не очень существен при расчетах овражного потенциала на распаханых землях, но уже сильно влияет на результаты расчетов для пастбищ и особенно для территорий под естественной растительностью.

Нами [Сидорчук, 1998а] метод расчета продольного профиля стабильного оврага был модифицирован: введены учет изменчивости шероховатости ложа и величины неразмывающей скорости по длине оврага и при изменении расходов воды, предложен способ учитывать все расходы воды, формирующие стабильный овраг.

Возвращаемся к записи формулы Шези через площадь водосбора F (5):

$$U_{cr} = \frac{\sqrt{S}}{n} d^{2/3} = \frac{\sqrt{S}}{n} p^{2/3} (kMF)^{2m/3} \quad (31)$$

или

$$S = \frac{(nU_{cr})^2}{p^{4/3}(kMF)^{4m/3}}. \quad (32)$$

Формула (32) переписывается в виде обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\frac{dz_0}{dL} = a(L)F(L)^{-b(L)}, \quad (33)$$

где площадь водосбора F , коэффициент $a = -\frac{(nU_{cr})^2}{p^{4/3}(kM)^{4m/3}}$

и показатель степени $b = 4m/3$ являются функциями расстояния L от устья оврага до данной точки продольного профиля. Оно легко решается при известных высотной отметке устья стабильного оврага Z_{00} и функциях $a(L)$, $b(L)$ и $F(L)$. Результатом решения является продольный профиль стабильного оврага при заданном модуле стока воды. Вид функции $F(L)$ для каждой выбранной линии тока определяется формой овражного водосбора. Для некоторых форм простой геометрии эта функция может быть задана аналитически. В общем случае функция $F(L)$ задается в табличной форме. Функция $a(L)$ определяется литологией прорезаемой толщи, шероховатостью и формой русла, функция $b(L)$ – формой русла. Они претерпевают разрывы в точках смены литологии и/или шероховатости, их также приходится задавать в виде таблицы. Так что обычно уравнение (33) решается численно, например, методом Рунге – Кутты.

Если нужно оценить только максимальную длину стабильного оврага, то достаточно рассчитать форму продольного профиля для некоторого слоя стока воды малой обеспеченности (например, 1%). Такой продольный профиль практически никогда выработанным не будет, но точка его пересечения с исходной поверхностью склона, на котором формируется овраг, фиксирует вершину стабильного оврага. Соответственно становится известной максимально возможная длина стабильного оврага L_m .

Если необходимо рассчитать наиболее вероятную форму выработанного продольного профиля, использовать только один расход воды малой обеспеченности невозможно. Время его прохождения недостаточно для формирования стабильного выработанного продольного профиля, а объем стока – для выноса соответствующего количества наносов. Уже давно сложилось представление о том, что все расходы воды, проходящие по руслу, в той или иной степени производят русловые переформирования [Маккавеев, 1955]. Для расчета выработанного продольного профиля стабильного оврага вдоль некоторой линии тока на первоначальном склоне с учетом всего диапазона формирующих его расходов воды предлагается следующая последовательность вычислений:

а) весь диапазон значений слоев стока разбивается на N интервалов с равными приращениями продолжительности ΔP ;

- б) для каждого $I + 1/2$ -го слоя стока воды $M_{i+1/2}$, приходящегося на середину i -того интервала, по формуле (15) рассчитывается скорость эрозии $E_{i+1/2}$ в каждой j -той точке продольного профиля;
- в) по уравнению (33) вычисляются отметки стабильного профиля оврага $Z_{i+1/2}$ для каждого $i + 1/2$ -го слоя стока воды во всех точках продольного профиля;
- г) производится расчет отметки эквивалентного продольного профиля стабильного оврага Z_{0j} путем осреднения с весом каждой группы из N отметок продольного профиля $Z_{i+1/2}$, которые относятся к j -той точке продольного профиля. В качестве весовой функции используется скорость эрозии $E_{i+1/2}$:

$$Z_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} Z_{i+1/2} E_{i+1/2}}{\sum_{i=1}^{N-1} E_{i+1/2}}, \quad (34)$$

- д) в каждой j -той точке продольного профиля вычисляется эквивалентная глубина вреза стабильного оврага D_t как разность отметки начальной поверхности склона Z_{ij} и вычисленной по (34) отметки дна оврага Z_{0j} .

Форма поперечного профиля стабильного оврага

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

$$\frac{C_h}{g * \rho_s * D_t} = \frac{\rho_s - w * \rho}{\rho} \tan(\phi) * \cos^2(\phi) - \frac{\sin(2\phi)}{2}. \quad (35)$$

Здесь C_h – связность грунтов, ϕ – угол внутреннего трения для грунтов бортов оврага, w – объемная влажность грунта, ρ_s и ρ – плотность грунта и воды, g – ускорение свободного падения. Часто этих исходных данных недостает, тогда целесообразно использовать эмпирические углы естественного откоса для данного типа грунтов.

Ширина дна оврага может быть представлена как функция расхода воды (16). По аналогии с формулой (34) вычисляется эквивалентная ширина дна стабильного оврага для всего диапазона расходов воды:

$$W_{bj} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} W_{i+1/2} E_{i+1/2}}{\sum_{i=1}^{N-1} E_{i+1/2}}. \quad (36)$$

Тогда форма поперечного профиля стабильного оврага опишется трапецией с высотой D_t , шириной по дну W_b и шириной поверху:

$$W_t = W_b + \frac{2D_t}{tg(\phi)}. \quad (37)$$

Слабым местом расчета выработанного профиля оврага является необходимость использования процедуры осреднения частных профилей

и ширин потока, образованных при разных формирующих расходах воды. Критическая скорость потока и шероховатость русла зависят от сложных комбинаций динамики потока, характера подстилающей поверхности русла, структуры и текстуры размываемых грунтов и особенностей растительного покрова. Сведения обо всех этих исходных данных обычно недостаточно точные. Значения критической скорости и коэффициента шероховатости (по Маннингу) входят в модель в квадрате, соответственно увеличивается ошибка метода. Эти и другие недостатки предложенной методики во многом сглаживаются процедурой калибровки величины критической скорости потока для каждого конкретного оврага по морфометрии соседних стабильных оврагов или для устойчивого участка его собственного 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. Здесь же можно измерить углы стабильного естественного откоса ϕ и оценить ширину дна стабильного оврага. Калибровка существенно уменьшает влияние на результаты расчета как ошибок при назначении расчетных параметров, так и неточностей, заложенных в основных предпосылках методики.

Расчеты по модели STABGUL были проведены [Sidorchuk et al., 2003] для системы оврагов Мботма в бассейне реки Мбулузи (Свазиленд), расположенных в 15 км к северу от г. Манзини (26°20' ю.ш.; 31°23' в.д.). Овраги прорезают однородную мощную (более 60 м) толщу коры выветривания по гранодиоритам, состоящую на 50% из песка, на 40% из алеврита и на 10% – из глины. Объемная плотность грунтов составляет 1,2 г/см³, связность – около 3 КПа. Поверхность водосбора используется под пастбище, растительность сильно выбита. Максимальный слой стока (за сутки) 1%-й обеспеченности составляет 29 мм.

Для оценок эмпирических характеристик статической модели был выбран овраг Мботма-старый с площадью водосбора 4,3 га. Его общая длина с отвешками составляет 440 м, или 80% длины начального склона, площадь овражной системы занимает более 60% водосборной площади. Овраг опирается на широкую речную террасу и стабилен по крайней мере последние 60 лет, судя по сравнению аэрофотоснимков разных годов заleta. Глубина основного оврага 7–10 м, поперечное сечение трапецеидальное с дном шириной 8–16 м, которая увеличивается с площадью водосбора F (км²) по связи: $W_b = 0,5F^{0,3}$. Эта связь использована в расчетах вместо (36). Стабильные борта оврага имеют крутизну $\phi = 49,2^\circ$ (стандартное отклонение $7,4^\circ$ для 35 измерений).

Подбором с минимизацией среднего квадрата отклонений рассчитанных и измеренных отметок продольного профиля стабильного оврага было определено значение придонной критической скорости начала размыва. Оно для гранодиоритовой коры выветривания составляет 0,18 м/с. Коэффици-

коэффициент шероховатости n получился равным 0,078, что вполне вероятно для днищ оврагов.

Полученные значения коэффициентов для статической модели были использованы при расчете потенциала овражной эрозии на водосборе оврага Мботма-новый. Площадь этого водосбора составляет 41,8 га, территория сложена корой выветривания по гранодиоритам и интенсивно используется для выпаса скота, растительный покров был сильно выбит. Овраг сформировался здесь в 1960-е гг.: в 1960 г. фиксировалась ложбина длиной 180 м, в 1971 г. овраг имел длину 220 м, к 1990 г. основной его ствол достиг 400 м длины, к 1998 г. – 490 м, образовались отвершки.

Результаты расчетов показывают, что в стабилизированном состоянии система Мботма-новый будет иметь ярко выраженную древовидную структуру с основным стволом длиной более 1000 м и тремя основными отвершками длиной 270–560 м.

Для сравнения рассчитанных и фактических продольных профилей стабильных оврагов также было обследовано несколько оврагов на юго-востоке Австралии [Сидорчук, 1998а]. Эта территория подверглась интенсивной овражной эрозии после 1810–1850 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 [Graham, 1988], 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, они достигли максимальной длины и медленно расширяются за счет выколаживания склонов. Это создает возможность для калибровки статической модели овражного потенциала.

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. Продольный профиль в суглинках находится в состоянии динамической устойчивости. До 1920–1925 гг. его отметки были близки к современным. В 30-е годы на дне оврага произошла аккумуляция наносов мощностью отложений 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 1920-х гг. Неразмывающая скорость для суглинков была определена обратным расчетом по морфологии профиля на нижних 100 м оврага. Она составила 1,5 м/с. Для сланцев неразмывающая скорость рассчитана тем же способом по верхней части профиля, она равна 2,7 м/с. Рассчитанный эквивалентный стабильный продольный профиль близок к фактическому, однако возможно продолжение врезания в суглинки в средней части оврага.

га. Конечная длина стабильного оврага Кипит может достигнуть 800 м, его объем – 95 440 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 цементированной дресвой. Современный овраг расположен на выпуклом делювиально-коллювиальном шлейфе. Нижняя часть вреза представляет собой балку с устойчивым днищем и пологими заросшими бортами. Этот участок был использован для калибровки неразрывающейся скорости, она составила 1,8 м/с. Это значение было использовано для расчета стабильного продольного профиля оврага. Его длина может составить 730 м, объем – 27 790 м³.

Овраг Брук Крик имеет длину по основному руслу около 1500 м, площадь водосбора 206 га. В 1838 г. длина основного ствола оврага составляла 800 м. К 1992 г. по основному руслу практически полностью выработан стабильный продольный профиль в сланцах и суглинках. Для последних с помощью процедуры калибровки подобрано значение критической скорости 1,4 м/с. Для всех выраженных в рельефе ложбин на водосборе этого оврага были рассчитаны стабильные отметки дна, глубины, ширины и объемы вреза. Таким образом, получена карта потенциала овражной эрозии на водосборе оврага Брук Крик. Однако далеко не все ложбины на водосборе могут перестроиться в овраги, и из общей потенциальной длины оврагов на этом водосборе в 9,9 км к 1992 г. было выработано только 4,1 км (41%), со средней скоростью около 20 м в год. К 2011 г. (за 20 лет) выработано еще 0,6 км оврагов.

Динамическая модель расчета овражного потенциала

Динамическая модель овражной эрозии [Сидорчук, 1998б] и ее модификация для условий криолитозоны [Sidorchuk, 2015] позволяет избавиться от многих допущений, которые присущи изложенным выше способам расчета овражного потенциала. В динамической модели расчет интенсивности овражной эрозии происходит в «реальном» времени, на всей длине линии тока на овражном водосборе при заданной последовательности расчетных расходов воды с учетом изменений литологии прорезаемой толщи, включая верхний слой почвогрунтов с растительностью. Динамическая модель позволяет проследить все стадии развития оврага начиная с эрозионной бороздины на склоне и кончая зрелой формой с выработанным продольным профилем. При этом максимально возможная длина оврага определяется уже на начальных этапах расчетов, которые нет необходимости доводить до стадии выработанного продольного профиля.

Модель в различных модификациях уже была описана [Сидорчук, 1998а, Sidorchuk, 2015], поэтому остановимся только на наиболее суще-

ственных ее элементах. Модель двумерная – рассчитываются изменения отметок дна и ширины оврага во времени по длине линии тока. Линии тока выделяются на всем водосборе оврага и покрывают его или полностью, или значительную часть. Так что расчет на совокупности линий тока дает трехмерную картину изменения во времени отметок поверхности водосбора.

Модель полуэмпирическая: базируется на теоретических предположениях, но широко используются эмпирические формулы. 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 (время между началом двух последующих периодов стока талых вод и/или дождевых паводков) делится на два этапа. На первом этапе (период стока) в ходе эрозионного или термоэрозионного размыва на первоначальном склоне или в днище оврага формируется прямоугольный врез с вертикальными стенками. В модели рассчитываются ширина вреза, равная максимальной ширине потока плюс ширине зоны подмыва бортов оврага, и глубина вреза, определяемая временем размыва (продолжительностью эрозионного эпизода) и его интенсивностью. На втором этапе (между периодами стока) прямоугольный эрозионный врез преобразуется склоновыми процессами. В модели оценивается устойчивость такого вреза по отношению к плоскому оползнию. Если глубина вреза превышает критическую высоту уступа для данных литологических условий, производится пересчет формы поперечного профиля из прямоугольного в трапецеидальный с шириной по днищу, равной максимальной ширине потока плюс суммарная ширина зоны подмыва бортов оврага за все время его развития, с уклоном бортов, равным уклону устойчивого откоса, и объемом выреза, равным суммарному объему размыва за все время развития оврага. Предполагается, что эта трансформация полностью происходит в период между последовательными эпизодами эрозии, что, конечно, 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 [Косов и др., 1978], эта стадия занимает лишь 5% общего времени развития оврага, но в этот период формируется 80% его длины, 60% площади и 35% его объема.

Скорость эрозии записывается с помощью формулы (15) как линейная зависимость скорости понижения отметок поверхности грунта Z от произведения удельного расхода воды q на уклон свободной поверхности потока S .

$$E = \frac{\partial Z}{\partial t} = k_E q S = -H k_E q \frac{\partial Z}{\partial x}. \quad (38)$$

При наличии мерзлых грунтов рассчитывается также термоэрозия как линейная зависимость скорости понижения отметок поверхности мерзлого грунта Z от температуры воды T .

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = Hk_T T. \quad (39)$$

Для периода снеготаяния применяется правило: если скорость термоэрозии (т. е. скорость протаивания грунтов) по формуле (39) больше скорости эрозии по формуле (38), т. е. появляется слой талого грунта и происходит его механическая эрозия, расчет ведется по формуле (38), в противном случае, когда поверхность мерзлого грунта все время обнажается и идет термоэрозия, ведется расчет по формуле (39).

Интенсивность эрозии сильно зависит от степени неравномерности скоростей потока, в частности, ускорения потока на ступенях продольного профиля, обычно многочисленных по длине оврага. Наиболее выражена ступень в вершине оврага, которая часто достигает нескольких метров в высоту. На этих ступенях формируется бурное течение, значение числа Фруда $Fr = U_c / \sqrt{gd}$ близко к 1, и скорость на ступени рассчитывается по формуле для широкого водослива: $U_c = m_0 \sqrt{2gH_0}$, (40) (здесь m_0 – коэффициент расхода на водосливе, H_0 – гидравлический напор).

Процесс размыва берегов в днище оврага исследован недостаточно. В первом приближении ширина днища W_b увеличивается пропорционально величине вертикального врезания, и dW_b/dt может быть рассчитана с помощью формулы:

$$\frac{dW_b}{dt} = k_b \frac{dZ}{dt} = \frac{V}{U} \frac{dZ}{dt}, \quad (41)$$

где V – поперечная скорость в потоке. Так как русло в днище оврагов обычно в той или иной степени извилистое, для оценки V можно использовать формулу И.Л. Розовского [1957]:

$$V = 11U \frac{d}{R}. \quad (42)$$

В узком врезанном днище оврага с шириной днища $W_b < 10,0W$ радиус кривизны R пологих ограниченных излучин потока тем больше, чем меньше ширина днища оврага W_b . Эмпирические данные по оврагам центрального Ямала показывают, что в этом случае

$$R = 50W \frac{W}{W_b}. \quad (43)$$

По мере размыва берегов и увеличения W_b радиус кривизны излучин русла уменьшается. Когда W_b становится $> 10,0W$, поток формирует свободные излучины с $R = 5,0W$.

После учета всех приведенных выражений коэффициент k_b в формуле (41) для расчета скорости бокового размыва в днище оврага приобретает вид:

$$\begin{aligned}
k_b &= 0,22d \frac{W_b}{W^2} \quad \text{при } W_b < 10W \\
k_b &= 2,2 \frac{d}{W} \quad \text{при } W_b \geq 10W \\
k_b &= 0 \quad \text{при } W_b > 20W
\end{aligned}
\tag{44}$$

Форма поперечного сечения эрозионного вреза, сформированного за время Δt , – это прямоугольник с 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 т. п.). Формируется устойчивый откос. В результате формируются прямые и слабовыпуклые склоны эрозионных форм, и прямоугольный эрозионный врез трансформируется в трапецию с шириной по днищу W_b , глубиной

$$D_t = \left(\sqrt{W_b^2 + \frac{4V_0}{\text{tg}(\phi)}} - W_b \right) \frac{\text{tg}(\phi)}{2}
\tag{45}$$

и шириной поверху, как у стабильного оврага (37):

$$W_t = W_b + \frac{2D_t}{\text{tg}(\phi)}.
\tag{46}$$

После каждого эпизода эрозии глубина оврага D_t пересчитывается с учетом увеличения его объема V_0 и изменения формы поперечного профиля.

Последовательность расчетов

Начальные данные включают: исходный продольный профиль; распределение площадей водосбора по длине оврага; инженерно-геологическое строение толщи, прорезаемой оврагом, отметки подошв всех слоев, коэффициенты эродированности и термоэрозии для составляющих их грунтов, гидравлическую крупность наносов, критические скорости течения; число лет, на которое проводится прогноз; количество эпизодов стока в каждом году; модули стока воды для всех эпизодов стока и их продолжительность; температуру воздуха для каждого эпизода стока.

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, которое задается 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 коэффициентов эродированности и термоэрозии, гидравлической крупности наносов и неразмывающей скорости. Вычисляются значения ширины, глубины и скорости потока с использова-

нием эмпирических формул связи этих гидравлических характеристик с расходом воды.

Одной из важнейших характеристик численного решения является его устойчивость. Необходимо выбрать такие значения величин шагов сетки по длине и по времени, чтобы условие Куранта $k_E q \frac{\Delta t}{\Delta x}$ было меньше 1.

Поэтому для всех точек продольного профиля проверяется это соотношение. Если условие Куранта больше 1, то временной интервал необходимо уменьшить. В этом случае расчет деформации продольного профиля выполняется несколько раз с одинаковыми гидрологическими характеристиками, но с уменьшенным шагом по времени. Необходима также проверка условия $U > U_{cr}$ и обнуление размывов в случае его невыполнения.

Рассчитывается объем размыва/аккумуляции за паводок и за весь период деформаций. Производится расчет формы поперечного профиля оврага в виде трапеции, его глубины и ширины (по дну и поверху).

Для применения динамической модели развития оврага хорошо подходят молодые антропогенные овраги на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения полуострова Ямал. Они находятся в первой стадии развития, быстро увеличивают длину за счет попятного отступления вершины и глубину за счет размыва днища. Активность склоновых оползней и оплывин достаточно высока для быстрой трансформации поперечного профиля оврага в период между паводками. Один из таких оврагов у площадки поселка ПББ (передвижная база бурения) расположен на правом борту р. Се-Яха. Овраг сформировался на длинном (970 м) пологом (28 %) левом борту крупной балки 10 в результате сочетания естественных криогенных процессов (быстрого сплыва) и антропогенных – увеличения стока воды с площадки поселка ПББ. Площадь водосбора оврага 330 000 м². Овражная форма отсутствовала еще в 1986 г., но уже в 1991 г. имела длину около 800 м (по долине). Она продолжает активно развиваться – за период 1991–1995 гг. овраг удлинился на 50 м и углубился на 1,5–2,0 м. У оврага два основных активных тальвега и большое количество отвершков. Восточный основной тальвег развивается в районе основной вертолетной площадки поселка ПББ. Так как этот тальвег уже в 1991 г. пересек дорогу, ведущую на вертолетную площадку, и его вершина достигла хранилища дизтоплива, проводятся работы по засыпке этого тальвега местным материалом и заравниванию эрозионной формы бульдозером. В дорожном полотне к вертолетной площадке сооружен водопропуск. Эти меры во многом замедлили развитие овражной эрозии, однако не остановили ее. Происходит врезание русла оврага, увеличение перепада высот в его вершине и увеличение потенциала термоэрозионного процесса. Вершина северного основного тальвега оврага располагается в районе метеоплощадки, а его отвершки заходят на насыпь поселка ПББ и вплотную подошли к сооружениям на его краю.

В 1991 и 1995 гг. продольный профиль оврага был снят в ходе тахеометрической съемки. Профиль начального склона был восстановлен по карте масштаба 1:25000. Литологическое строение толщи определено по результатам бурения.

Необходимые метеорологические данные (температура воздуха и осадки) снимались по данным ближайших метеостанций. Так как в Арктике сеть метеостанций редкая, приходится прибегать к данным, полученным реанализом по равномерной сетке (например, в версии реанализа ERA-5 шаг сетки составляет $0,25^\circ \times 0,25^\circ$). На основании этих метеоданных рассчитывались расходы воды по гидрологической модели [Matveeva, Sidorchuk, 2020], которая была откалибрована по данным наблюдений на Ямале экспедицией МГУ в 1990–1992 гг. и ГГИ 1992–1993 гг. [Бобровицкая, Баранов и др., 1999]. Оценка по этой модели стока во время снеготаяния и дождей обеспечила необходимыми входными данными расчеты по формулам модели. Коэффициенты k_E и k_T в формулах (38) и (39) подобраны по данным наблюдений 1995 г. за размывом дна оврага и на основании калибровки метода расчета сравнением рассчитанных и измеренных отметок продольного профиля для периода 1986–1995 гг. Расчеты с помощью откалиброванной модели дали вполне удовлетворительные результаты. В то же время численные эксперименты показали довольно высокую чувствительность модели к вариациям исходных данных. В первую очередь это касается точности задания литологии прорезаемой толщи, величин коэффициентов и значений неразмывающей скорости. В меньшей степени модель реагирует на случайные отклонения в величинах стока воды.

Дальнейшее развитие оврага определяется повышенным стоком воды с территории поселка ПББ, где зимой накапливается практически весь снег, переносимый метелями с окрестной тундры. Расчет на период 50 лет с учетом этого фактора и при полном уничтожении растительности по линии развития оврага (что фактически уже существует) показал, что за первые 10 лет овраг врежется еще на 4–5 м по всей длине. Отступление вершины оврага будет не столь интенсивным, так как большая часть длины оврага выработалась уже к настоящему времени. В дальнейшем врезание оврага замедлится в связи с уменьшением его уклона. Однако расчет указывает на формирование крупной эрозионной формы, а анализ современной разветвленности оврага показывает, что эрозией будет затронута большая площадь. Овраг 9 представляет непосредственную и значительную угрозу существованию поселка ПББ.

С помощью динамической модели также были проведены расчеты развития оврага Брук Крик на юго-востоке Австралии [Сидорчук, 1998б] и оврага Мботма-новый [Sidorchuk, Marker et al., 2001]. Для характеристики этих оврагов была применена и статическая модель (Сидорчук, 1998а; Sidorchuk et al., 2003).

По данным расчетов (проведенных в 1999–2000 гг.), к 2010 г. длина основного ствола оврага Мботма-новый (при условии продолжения интенсивного перевыпаса на его водосборе) достигнет 500 м, в вершине его наметятся все главные отвершки. Еще через сто лет, в 2110 г., рассчитанная морфология оврага (при условии сохранения современных климата и землепользования) существенно усложняется. Длина основного ствола оврага достигнет 1040 м, сформируются три крупных отвершка. Коэффициент k_E для этих расчетов подобран сравнением рассчитанных и измеренных отметок продольного профиля для периода 1960–1998 гг.

Сравнение результатов расчетов эволюции оврага Мботма-новый, проведенных с помощью статической и динамической моделей овражной эрозии, показывает их общее соответствие друг другу. Однако полная стабилизация продольных и поперечных профилей основного оврага и его отвершков будет происходить еще очень долго. Наиболее быстро будет происходить рост оврага в длину, медленнее будут увеличиваться его площадь и объем. Расчеты качественно совпадают с результатами, полученными в физическом эксперименте [Косов и др., 1978].

Расчеты как по статической, так и по динамической модели развития оврага нельзя считать прогнозными. Формирование овражной системы занимает очень долгое время, на протяжении которого изменяются и климат, и условия землепользования на водосборе. Обычно эти расчеты проводятся в рамках проектов по организации противоэрозионных мероприятий, при реализации которых целенаправленно изменяются условия формирования стока воды и устойчивость грунтов к размыву. Так, после проведения расчетов для оврага Мботма-новый на его водосборе практически прекратился выпас скота, что привело к существенному увеличению противоэрозионной стойкости растительного покрова и замедлению роста оврага, его длина в 2009–2020 гг. лишь несущественно превышала его длину в 1998 г.

Сравнение различных способов расчета овражного потенциала

Модели овражной эрозии делятся на две основные группы – статические и динамические. Статические модели используются для расчета потенциала овражной эрозии на конечной стадии их развития (оценка «снизу») или только определения потенциально возможного места заложения оврага (оценка «сверху»). Они допускают существенное уменьшение количества исходных данных и поэтому более часто используются. Самыми простыми являются методы расчета овражного потенциала для максимальных расходов воды малой продолжительности и заданной величины критической скорости потока. Это – расчет по модели Е.Ф. Зориной [1979], где даже начальный рельеф представлен только одной величиной – перепадом высот на водосборе, и расчет по модели GER и получение на цифровой модели ре-

льефа области потенциального появления оврагов. Более сложные статические модели требуют знания функции распределения (продолжительности) величин слоя стока. В таком случае можно применять для расчета модель TGEV и получать на цифровой модели рельефа распределения оценки величины овражной эрозии с учетом всего эрозионно опасного стока. Такая же информация дает возможность применить модель STABGUL для расчета выработанного продольного и поперечного профиля оврага, в которой также учитывается действие всего эрозионно опасного стока и, кроме того, пространственная неравномерность литологии прорезаемой толщи, шероховатости и формы русла.

Наконец, динамическая модель GULTEM позволяет провести расчет как изменения морфологии конкретных оврагов во времени и в пространстве, так и овражного потенциала территории. Расчет интенсивности овражной эрозии происходит в «реальном» времени, на всей длине линии тока на овражном водосборе при заданной последовательности расчетных расходов воды с учетом изменений литологии прорезаемой толщи, включая верхний слой почвогрунтов с растительностью. Динамическая модель позволяет проследить все стадии развития оврага начиная с эрозионной бороздины на склоне и кончая зрелой формой с выработанным продольным профилем. Однако для использования динамической модели требуется большое количество исходных данных. Такова цифровая модель рельефа (или топографическая карта) для получения начальных профилей склонов, модель литологического сложения прорезаемой оврагами толщи, гидрографы стока воды для всего расчетного периода и эмпирические коэффициенты, входящие в модель. Из последних наиболее сложно получить коэффициенты эродированности прорезаемых овражной эрозией грунтов. Часто эти коэффициенты можно найти только путем калибровки модели, подбором. Для такой калибровки необходимы наблюдения за трансформацией продольных профилей оврагов на данной территории.

Предлагаемый набор моделей расчета овражного потенциала позволяет выбрать оптимальный путь оценки безопасности территории для возможного использования [Sidorchuk, 2021]. Целесообразно начинать с простейших экспресс-методов оценки «сверху», которые позволяют выделить территории с разной степенью риска появления оврагов, например, с помощью модели GER. Потребуются исходная цифровая модель рельефа, величина максимально возможного для данного водосбора слоя стока воды и критическая скорость начала размыва поверхностного слоя грунта (обычно с растительностью). Следующим шагом будет более точный расчет овражного потенциала с использованием всего эрозионно опасного стока по модели TGEV. Если необходимо представить себе эрозионный рельеф на конечных стадиях развития овражной эрозии (но в современных климатических

условиях), можно использовать модель расчета выработанного продольного профиля оврага STABGUL. Наконец, для составления проекта освоения территории необходимо применить динамическую модель, что потребует проведения специальных изысканий для калибровки модели GULTEM.

Литература

Адерихина Л.А., Адерихин В.В. Потенциал роста оврагов в длину в условиях мелового юга Среднерусской возвышенности // Восьмое межвуз. координац. совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Воронеж. 1993. С. 5–6.

Бобровицкая Н.Н., Баранов А.В., Василенко М.Н., Зубкова К.М. Сток воды и наносов на овражных водосборах // Эрозионные процессы центрального Ямала. СПб.: РНИИ культурного и природного наследия. 1999. С. 90–105.

Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд-во МГУ, 2001. 240 с.

Зорина Е.Ф. Расчетные методы определения потенциала овражной эрозии // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во МГУ. 1979. С. 81–89.

Косов Б.Ф., Никольская И.И., Зорина Е.Ф. Экспериментальные исследования оврагообразования // Экспериментальная геоморфология. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ. С. 113–140.

Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Эродирующая и транспортирующая способность мелководных потоков // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. М.: Изд-во МГУ. С. 8–28.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 346 с.

Мирицулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 303 с.

Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР. 1957. 188 с.

Сидорчук А.Ю. Модель для расчета морфометрии стабильного оврага // Геоморфология. 1998а. № 2. С. 43–52.

Сидорчук А.Ю. Динамическая модель овражной эрозии // Геоморфология. 1998б. № 4. С. 28–38.

Сидорчук А.Ю. Экспресс-метод оценки овражного потенциала // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 1. С. 54–61.

ArcticDEM, 2018. Harvard Data V1.<https://doi.org/10.7910/DVN/ОННУКН>

Graham O.P. Land Degradation Survey of N.S.W // Soil Conservation Service of N.S.W. Tech.Rep. 7, 1988. 47 p.

Matveeva T.; Sidorchuk, A. Modelling of surface runoff on the Yamal peninsula, Russia, using ERA5 reanalysis // *Water*. 2020. No. 1. P. 2099.

Montgomery D.R., Dietrich W.E. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds // *Process Models and Theoretical Geomorphology*. New York. 1994. P. 221–246.

Patton P.C., Schumm S.A. Gully erosion, north western Colorado: a threshold phenomenon // *Geology* 1975. No. 3. P. 83–90.

QGIS Development Team, 2004–2019. V3.10 <https://qgis.org> .

Sidorchuk A., Marker M., Moretti S., Rodolfi G. Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland // *Catena*. 2003. Vol. 50 (2-4). P. 507–525.

Sidorchuk A. Models of gully erosion by water // *Water*. 2021. Vol. 13. No. 22. P. 3293.

Sidorchuk A. Gully erosion in the cold environment: Risks and hazards // *Adv. Environ. Res.* 2015. Vol. 44. P. 139–192.

Sidorchuk A. The potential of gully erosion on the Yamal peninsula, West Siberia // *Sustainability*. 2020. No. 12. P. 1–17.

Sidorchuk A., Grigor'ev V. Soil erosion on the Yamal peninsula (Russian Arctic) due to gas field exploitation // *Adv. GeoEcology*. 1998. No. 31. P. 805–811.

Sidorchuk A., Marker M., Moretti S., Rodolfi G. Soil Erosion Modelling in the Mbuluzi River Catchment (Swaziland, South Africa). Part 1. Modelling of the dynamic evolution of gullies // *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 2001. No. 24, P. 177–187.

Torri D., Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments // *Earth Sci. Rev.* 2014. No. 130. P. 73–85.

Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes // *J. Geol.* 1960. Vol. 68. P. 54–74.