

Динамико-стохастическая модель овражной эрозии.

А.Ю.Сидорчук и А.А.Сидорчук

<sup>1</sup>Географический факультет МГУ, 119899, Москва

<sup>2</sup>Факультет ВМиК МГУ, 119899, Москва

Разработана модель GULTEM для расчета изменения морфологии оврага в начальный период его развития в ходе процессов эрозии и термоэрозии. Она включает в себя следующие процедуры: 1) Анализ цифровой модели рельефа (ЦМР) включает в себя оригинальные алгоритмы заполнения (или соединения) бессточных углублений; расчета направлений линий тока; расчета площадей частных водосборов и уклонов в каждой точке расчетной сетки. 2) Построение геолого-литологических блок-диаграмм по данным о литологическом строении толщи в отдельных скважинах с заданными координатами. 3) Определение эродируемости мерзлых грунтов на основании эмпирической зависимости скорости размыва от температуры воды. 4) Определение эродируемости немерзлых грунтов на основании эмпирической зависимости скорости размыва от скорости потока, донного касательного напряжения, крупности почвенных агрегатов и сцепления грунтов. При этом учитывается сложное строение прорезаемой оврагом толщи. 5) Расчет поступления воды на водосбор для периода снеготаяния в условиях мерзлых грунтов по методике Комарова и стока воды по уравнению кинематической волны без учета инфильтрации. 6) Расчет стока воды для периодов дождей по уравнению кинематической волны с учетом инфильтрации (по уравнениям Ричардсона, Грина-Эмпта и Холтана) и поверхностного задержания по формулам Попова. 7) Определение критических скоростей потока (в том числе с учетом влияния густоты растительного покрова). 8) Расчет изменения продольного профиля оврага. 9) Расчет изменения поперечного профиля оврага. 10) Расчет общей величины овражной эрозии и термоэрозии на водосборе.

Входом в модель служат: цифровая модель рельефа с оцифровкой основных граней рельефа и данными о геометрии микрорельефа; информация о литологии и инженерно-геологических характеристиках грунтов для всей прорезаемой толщи; метеорологические данные: ряды наблюдений за температурой воздуха, мощностью и плотностью снежного покрова, осадками на метеостанциях, распределении снега по площади водосбора; данные о растительности с указанием степени нарушенности поверхности, густоты дернины, сомкнутости и типе растительности; данные о расположении инженерных сооружений. Часть из этих параметров имеют вероятностную природу, другие задаются интерполированием имеющихся в наличии неполных данных. Кроме того, во многих данных имеются ошибки измерений.

Введение в модель стохастической компоненты позволяет учесть пространственно-временную изменчивость природно-антропогенных факторов эрозии и учесть при расчетах ошибки исходной информации. Проведено исследование чувствительности модели GULTEM по отношению к вероятностной изменчивости отметок поверхности водосбора, его литологии и характера растительного покрова.

Отметки высот в узлах прямоугольной сетки  $Z_{ij}$  измеряются фотограмметрическим путем и в условиях безлесной местности имеют точность  $\pm 0.3$  м. При моделировании распределение ошибки измерения было задано нормальным  $N(0,0.023)$ , т.е.  $2\sigma = 0.3$ . С помощью метода Монте-Карло моделировались ошибки измерений  $E_{ij}$  в точках  $(i, j)$  как независимые случайные величины. Было проведено 311 расчетов. Результатом каждого расчета является массив  $h_{ij}$  высот в узлах прямоугольной сетки. Визуальное сравнение сетей линий тока при различных реализациях смоделированных ошибок измерений показало, что наиболее сильно эти ошибки сказываются в областях сложно построенного рельефа (например, на склонах ложбин). Здесь расхождения в положении линии тока, дренирующей один и тот же частный водосбор, достигают 3-4 пикселей. В качестве количественной характеристики

изменчивости были выбраны общая площадь оврагов на водосборе и площадь оврагов, приходящихся на территорию поселка. Для выборки из 311 элементов с помощью критерия  $\chi^2$  проверялась гипотеза о нормальности распределения.  $P$ -значение критерия  $\chi^2$  получено равным 0.33 и гипотеза признана не противоречащей данным.. Критерием завершения эксперимента было достижение устойчивости распределения площадей. Коэффициент вариации площадей оврагов за счет ошибок в задании отметок высот водосбора составил 0.13.

Для оценки чувствительности модели GULTEM к пространственной изменчивости размываемости грунтов были построены функции распределения основных параметров формул для расчета коэффициента эродированности и критической скорости начала размыва – среднего диаметра агрегатов  $d$ , сцепления  $C_0$  и объемной доли тонких корней в грунте  $R$ . Для исследования пространственного распределения этих величин использовались случайные серии натуральных измерений в различных точках водосбора. Получены следующие результаты:

$d$  подчиняется гамма-распределению с плотностью  $f_{g(\alpha,\beta)} = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}$  с

параметрами  $\alpha = 0.775$  и  $\beta = 0.433$ ,  $C_0$  подчиняется гамма-распределению с параметрами  $\alpha = 0.7158$  и  $\beta = 6.94$ ; для оценки характера распределения  $R$  по водосбору использовалась зависимость между немногочисленными полевыми измерениями и фототоном на аэрофотоснимках.

Проведено исследование распределения разностей начальных и результирующих высот в точках сетки при различных реализациях эрозионных параметров  $d, C_0$  и  $R$ . Вид распределений во всех точках совпадает, а параметры зависят от местных условий. Гистограмму частот выборки можно условно разбить на две части: скачок на отрезке  $[0, \Delta x]$  и правую часть, где  $\Delta x$  - изменение высоты, которое можно считать несущественным. Были рассмотрены такие параметры как математическое ожидание  $\mu_{ij}$  правой части, дисперсия правой части  $\sigma_{ij}^2$  и

величина скачка  $\left(\frac{n_1}{\Delta x}\right)_{ij}$  на отрезке  $[0, \Delta x]$ . Были построены зависимости этих параметров от математического ожидания разности начальных и результирующих высот  $m_{0,ij}$ .

Выяснилось, что эта зависимость довольно тесная:

$$\mu_{ij} \approx \begin{cases} 0, m_{0,ij} = 0 \\ 0.708 + 0.1188 \cdot m_{0,ij}, m_{0,ij} > 0 \end{cases}$$

$$\sigma_{ij}^2 \approx 0.0177 \cdot m_{0,ij} + 0.0023 \cdot m_{0,ij}^2,$$

$$n_{1,ij} \approx 1.00 - 0.001 \cdot m_{0,ij} + 7.99 \cdot m_{0,ij}^2$$

Исследования показали, что объем выноса наносов и результирующий профиль оврагов наиболее чувствителен к изменчивости и ошибкам в задании данных о литологии. Достоверность расчетов изменения морфологии оврагов находятся в прямой зависимости от качества измерений на местности отметок залегания различных грунтов и их инженерно-геологических характеристик. Следующим по значимости параметром, изменчивость которого определяет эволюцию оврага, является сток воды, особенно в период снеготаяния.