

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ГЕОГРАФИЯ И ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ

4

(Отдельный оттиск)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск · 1980

ки, они начинают появляться во второй. Здесь блуждающие мелкие ручейки и созданные ими промоины срезают поверхностный слой на глубину максимального врезания. Это служит предпосылкой возникновения постоянных борозд, которые, имея значительный водосбор, начинают формировать эрозионные врезы в третьей зоне. Это зона зарождения крупных эрозионных врезов, переходящих в склоновые овраги.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКЛОНОВОГО ПОТОКА НА УСЛОВНОМ ЕДИНИЧНОМ СКЛОНЕ

Для выровненного склона, на котором происходит плоскостной смыв, примем следующие значения ширины и уклона соответственно: $B = 10$ м и $\sin 10^\circ = 0,1736$. Кинетическая энергия рассчитывается на 1 м длины склона. Если толщина слоя потока (h) в точке расчета его кинетической энергии составляет 3 см, его энергию можно установить по формуле

$$E = \frac{MV^2}{2} = \frac{\rho h B}{2} \left(\frac{1}{n} h^{2/3} \sqrt{\sin \alpha} \right)^2 = \frac{\rho B}{2n^2} h^{7/3} \sin \alpha, \quad (1)$$

где $\rho = 1000$ кг/м³ — плотность воды; M, V — масса и скорость рассматриваемого объема воды; n — параметр шероховатости. Принимая параметр шероховатости равным 0,02, получим $E = 5,657$ Дж. Энергия потока на единицу его ширины составит: $\bar{E} = E/B = 0,5657$ Дж.

Предположим, что на рассматриваемом склоне проведена продольная вспашка с количеством борозд $m = 10$, треугольного (условно) сечения с углом в основании сечения борозды $\beta = 60^\circ$. В этом случае через рассматриваемый участок склона будет протекать то же количество воды ($W = 0,3$ м³), что и в предыдущем, если параметры n, α не изменились.

Сравним энергию потоков в этих двух случаях, т. е. определим, насколько увеличится кинетическая энергия потока (γ) при продольной распашке (E') по сравнению с выровненным склоном:

$$\gamma = \frac{E'}{E} = \left(\frac{V'}{V} \right)^2 = \left(\frac{R}{h} \right)^{4/3}, \quad (2)$$

где R — гидравлический радиус треугольного сечения борозды. В этом случае

$$R = b/4 \sin \beta, \quad (3)$$

где b — ширина потока в борозде.

$$\text{Объем воды в каждой борозде будет } W_i = \frac{W}{m} = \frac{0,3 \text{ м}^3}{10} = 0,03 \text{ м}^3.$$

Величину b найдем из уравнения

$$W_i = \frac{W}{m} = \frac{b^2}{4} \operatorname{tg} \beta, \quad (4)$$

откуда

$$b = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4W}{m \operatorname{tg} \beta}}. \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в формулу (3), получим

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{W}{m \operatorname{tg} \beta}} \sin \beta. \quad (6)$$

Соотношение (2) с учетом формулы (6) и соотношения $h = \frac{W}{B}$ дает следующее значение для γ :

$$\gamma = \left(\frac{B}{2} \sqrt{\frac{\sin \beta \cos \beta}{mW}} \right)^{4/3} \quad (7)$$

А. М. ТРОФИМОВ, В. М. МОСКОВКИН

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ЗОНАХ ДЕЛЮВИАЛЬНОГО СКЛОНА

Изучение природных ресурсов, рациональное природопользование и другие вопросы современной географии вызывают необходимость количественной оценки земель для последующего их использования. Одним из видов подобной оценки выступает оценка интенсивности природных процессов, которая может быть положена в основу комплексной оценки хозяйственного освоения территории.

ОСНОВНЫЕ ЗОНЫ ДЕЛЮВИАЛЬНЫХ СКЛОНОВ

По характеру протекания современных процессов склоны подразделяются на 2 категории: С-СВ и Ю-ЮЗ экспозиции. На склонах Ю-ЮЗ экспозиции, в свою очередь, выделяются четыре зоны [Трофимов, 1974] по преобладанию 1) плоскостного смыва; 2) мелкоручейкового смыва; 3) линейной эрозии; 4) аккумуляции. В первой зоне на поверхности склона потоки воды не успевают сформировать заметные бороздки или рывтин-

Из выражения (7) следует, что чем больше борозд (m), тем меньше γ . Для нашего случая $\gamma = 2,354$ и $E' = 13,316$ Дж.

Энергия потока на единицу длины смоченного параметра (κ) всех борозд составляет $\bar{E}' = \frac{E'}{m\kappa} = 2,529$ Дж, тогда по сравнению с плоскостным стоком она увеличивается в следующее число раз:

$$\lambda = \frac{\bar{E}'}{E} = \frac{2,529 \text{ Дж}}{0,5697 \text{ Дж}} = 4,472.$$

В общем случае

$$\lambda = \left(\frac{B}{2}\right)^{7/3} \left(\frac{\sin \beta \cos \beta}{mV}\right)^{7/6}. \quad (8)$$

Аналогичные расчеты можно вести и по расходу воды Q ($\text{м}^3/\text{мин}$), тогда энергию предыдущих случаев следует рассматривать как мощность потоков N (Дж/мин):

$$N = \frac{\rho}{2} QV^2 = \rho \frac{Q}{2n^2} \left(\frac{Qn}{60B \sqrt{\sin \alpha}}\right)^{4/5} \sin \alpha, \quad (9)$$

$$N' = \frac{\rho Q}{4n^2} (\sin \beta \cos \beta)^{1/2} \left(\frac{Qn}{60m \sqrt{\sin \alpha}}\right)^{1/2} \sin \alpha, \quad (10)$$

$$\bar{N} = \frac{N}{B} = \rho \frac{Q}{2Bn^2} \left(\frac{Qn}{60B \sqrt{\sin \alpha}}\right)^{4/5} \sin \alpha, \quad (11)$$

$$\bar{N}' = \frac{N'}{m\kappa} = \frac{60^{-1/2} \rho Q}{n^2 m} (\sin \beta)^{3/4} (\cos \beta)^{3/2} \left(\frac{Qn}{m \sqrt{\sin \alpha}}\right)^{1/8} \sin \alpha. \quad (12)$$

В последней формуле величина κ рассчитывалась по формуле

$$\kappa = \frac{b}{\cos \beta} = \left[\frac{4^{5/3} Qn}{60m (\sin \beta)^{2/3} \text{tg} \beta \sqrt{\sin \alpha}} \right]^{3/8} \frac{1}{\cos \beta}. \quad (13)$$

Множитель 60 в приведенных формулах нужен для перехода к секундно-му расходу воды при вычислении гидравлического радиуса.

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ЗОНАХ СКЛОНА

Исходным материалом для оценки послужили данные, полученные на склонах отвалов карьеров урочища Гарь Кирсинского района Кировской области.

В географическом отношении территория исследования входит в провинцию южной тайги и смешанных лесов Вятско-Камской возвышенности, в группу районов подзоны южной тайги (по сетке физико-географического районирования Среднего Поволжья, составленной А. В. Ступишиным (1964)). Располагается она между двумя районами: Черно-Холуницким водораздельно-равнинным с еловыми и березово-осиновыми лесами и Верхнекамским высоковозвышенным с господством еловых лесов. Граница между этими районами проходит южнее г. Кирс.

Исследуемая территория сложена породами пермского и мезозойского возраста, перекрытыми маломощным чехлом четвертичных отложений. Поверхность выровненная, кое-где встречаются междуочечные останцовые грядовые возвышенности. Основной фон создает поверхность нижнего плато с преобладанием абсолютных высот 180—240 м. Местные эрозионные врезы обычно не превышают 40 м. Особенности рельефа, наличие ва-

лунных суглинков, водно-ледниковых песчаных отложений, а также повышенная увлажненность территории способствуют заболочиваемости. Лесистость значительна (до 80%), типичны южнотаежные леса.

В урочище Гарь, расположенном в 5 км к югу от г. Кирс, карьерным способом добывается гравийно-галечная смесь. Высота стенок карьера 4—6 м при уклонах до 60° и выше, у осыпных образований — до 30—35°. Вокруг карьера высятся огромные отвалы. Их длинные незадернованные склоны служат естественной лабораторией для изучения закономерностей зарождения, формирования и развития мелколучейкового и бороздкового смыва. Перечисленные ранее три склоновые зоны здесь выражены весьма отчетливо. Карьер работает не один десяток лет, поэтому на склонах отвала можно изучать и пространственно-временные аналогии.

Приведем обозначения для морфометрических и гидравлических характеристик трех основных склоновых зон эрозионного смыва одинаковой ширины (B).

Зона I — B ; A_1 ; Q_1 ; n_1 ; α_1 ; δ_1 ;
зона II — B ; A_2 ; Q_2 ; n_2 ; α_2 ; δ_2 ; β_2 ; m_2 ;
зона III — B ; A_3 ; Q_3 ; n_3 ; α_3 ; δ_3 ; β_3 ; m_3 ,

где A — длина зон эрозионного смыва; m — количество водороев и эрозионных борозд; Q — расходы воды в конечных створах зон; n , δ — параметры шероховатости и коэффициенты стока зон; α — углы наклона зон; β — углы оснований треугольных сечений водороев и эрозионных борозд.

Расход воды в конечных створах зон в установившейся фазе склонового стока во время выпадения осадков интенсивности I (мм/мин) запишем как:

$$Q_1 = 10^{-3} I \delta_1 B A_1 \cos \alpha_1; \quad (14)$$

$$Q_2 = 10^{-3} I B (\delta_1 A_1 \cos \alpha_1 + \delta_2 A_2 \cos \alpha_2); \quad (15)$$

$$Q_3 = 10^{-3} I B (\delta_1 A_1 \cos \alpha_1 + \delta_2 A_2 \cos \alpha_2 + \delta_3 A_3 \cos \alpha_3). \quad (16)$$

Заметим, что для ручейкового стока и стока по бороздам формулы (15), (16) справедливы приближенно. Мощность потока в конечном створе зоны I (N_1) определяется по формуле (9) с соответствующими индексами для Q , n и α .

Для второй и третьей зон справедлива формула (10), для расчета мощностей потоков на единицу длины смоченного периметра — (11) и (12).

Приводим соотношения N_2/N_1 и N_3/N_2 :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{60^{3/10} Q_2^{3/2} n_1^{6/5} (\sin \alpha_2)^{3/4} B^{4/5} (\sin \beta_2 \cos \beta_2)^{1/2}}{Q_1^{9/5} n_2^{3/2} (\sin \alpha_1)^{3/5} m_2^{1/2}}; \quad (17)$$

$$\frac{N_3}{N_2} = \left(\frac{Q_3}{Q_2}\right)^{3/2} \left(\frac{\sin \beta_3 \cos \beta_3}{\sin \beta_2 \cos \beta_2}\right)^{1/2} \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^{-3/2} \left(\frac{m_3}{m_2}\right)^{-1/2} \left(\frac{\sin \alpha_3}{\sin \alpha_2}\right)^{3/4}. \quad (18)$$

При $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$; $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$; $\beta_2 = \beta_3$ из соотношения (18) получим

$$\frac{N_3}{N_2} = \left(1 + \frac{A_3}{A_1 + A_2}\right)^{3/2} \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^{-3/2} \left(\frac{m_3}{m_2}\right)^{-1/2}. \quad (19)$$

Для конкретного расчета примем следующие средние типичные характеристики зон исследованных склонов: $B = 10$ м, $A_1 = 6$ м, $\alpha_1 = 6^\circ$, $A_2 = 9$ м, $\alpha_2 = 9^\circ$, $m_2 = 26$, $\beta_2 = 45^\circ$, $A_3 = 12$ м, $\alpha_3 = 27^\circ$, $m_3 = 6$, $\beta_3 = 55^\circ$. За неимением конкретных данных параметров δ , n , I примем одинаковые для всех зон значения: $\delta = 0,5$; $n = 0,02$; $I = 1$ мм/мин.

По формулам (17), (18) с учетом (14), (15), по которым $Q_1 = 29,835 \times 10^{-3}$ м³/мин, $Q_2 = 74,882 \cdot 10^{-3}$ м³/мин, $Q_3 = 127,742 \cdot 10^{-3}$ м³/мин, получим $\frac{N_2}{N_1} = 124,313$, $\frac{N_3}{N_2} = 10,098$.

В пересчете на единицу длины смоченного периметра получим:

$$\frac{\bar{N}_2}{\bar{N}_1} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{B}{m_2 \kappa_2} = 124,313 \frac{10}{9,946} = 124,934;$$

$$\frac{\bar{N}_3}{\bar{N}_2} = \frac{N_3}{N_2} \cdot \frac{m_2 \kappa_2}{m_3 \kappa_3} = 10,098 \frac{9,946}{4,329} = 23,204.$$

Из этих расчетов видно, как изменяется мощность потоков от зоны к зоне. Таким образом, в установившейся стадии стока мощности потоков в конечных створах зон II и III могут в сотни и тысячи раз превышать мощность плоскостного стока в I зоне делювиального склона.

Экспериментальные исследования по эрозионному смыву [Foster, Meyer, 1972] показали, что при уклоне в 8° смыв по бороздам на порядок интенсивнее плоскостного, что в определенной мере согласуется с приведенными теоретическими выводами.

Для сравнения полученных энергетических характеристик склоновых потоков с аналогичными характеристиками капельно-дождевой эрозии необходимо рассчитать мощность потока на единицу его ширины для первой зоны по формуле (11). Получим $\bar{N}_1 = 0,01512$ Дж/м²·мин. Поскольку интенсивность дождя принималась как $I = 1$ мм/мин, то размерность полученной мощности совпадает с размерностью кинетической энергии осадков (Дж/м²·мм).

Максимальные значения кинетической энергии могут достигать 30—40 Дж/м²·мм, т. е. на три порядка могут превышать мощность плоскостного потока. Далее, $\frac{\bar{N}_3}{\bar{N}_2} \approx 3000$, следовательно, мощность смыва по бороздам в III зоне одного порядка с энергией наиболее мощных дождей. Данный анализ проясняет взаимоотношение процессов эрозионного смыва и капельно-дождевой эрозии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ УКЛОНА, ПРИ КОТОРОМ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ МАКСИМАЛЬНЫЙ СМЫВ

Допустим, на прямолинейном склоне длины l во время дождя происходит плоскостной смыв. Нужно определить уклон склона, при котором смыв со всего склона будет максимальным. Существование максимального смыва следует предположить из тех соображений, что в предельных случаях (уклоны $\alpha = 0$ и 90°) смыв со склона практически отсутствует. Смыв определяется в единицу времени через твердый расход q в конечном створе склона по формуле

$$q = \rho Q, \quad (20)$$

где ρ — мутность, Q — расход воды в конечном створе. Для мутности примем следующие три зависимости, близкие к формулам, известным из гидравлики:

$$\rho_1 = \frac{K_1 V}{h}; \quad \rho_2 = \frac{K_2 V^2}{h}; \quad \rho_3 = \frac{K_3 V^3}{h}. \quad (21)$$

Расход воды в конечном створе в установившейся фазе стока, как и ранее, запишем по формуле

$$Q = I b \delta \cos \alpha, \quad (22)$$

где I — интенсивность дождя, м/с. Скорость потока, как и прежде, возьмем по формуле Шези и Маннинга

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} \sqrt{\sin \alpha}. \quad (23)$$

Из соотношения $Q = Vh$ и формул (22), (23) определим величину h

$$h = \left(\frac{I b \delta n \cos \alpha}{\sqrt{\sin \alpha}} \right)^{3/5}. \quad (24)$$

С учетом формул (20)—(22), (24) получим три вида формул для определения твердого расхода

$$q_1 = K_1 (I \delta l)^{4/5} n^{-6/5} (\cos \alpha)^{4/5} (\sin \alpha)^{2/5}; \quad (25)$$

$$q_2 = K_2 (I \delta l)^{6/5} n^{-9/5} (\cos \alpha)^{6/5} (\sin \alpha)^{9/10}; \quad (26)$$

$$q_3 = K_3 (I \delta l)^{8/5} n^{-12/5} (\cos \alpha)^{8/5} (\sin \alpha)^{6/5}. \quad (27)$$

Формулы (25)—(27) являются формулами типа

$$q = K (\cos \alpha)^m (\sin \alpha)^n. \quad (28)$$

Заменяя в формуле (28) косинус на синус и делая замену $\sin^2 \alpha = x$, придем к функции

$$q = K(1-x)^{m/2} x^{n/2}, \quad (29)$$

максимум которой находится в точке

$$x = \frac{n}{n+m}. \quad (30)$$

Таким образом, уклон склона, при котором происходит максимальный смыв, определяется выражением

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{n}{n+m}}. \quad (31)$$

Итак, в первом случае $\sin \alpha_1 = \sqrt{1/3}$ и $\alpha_1 \approx 35^\circ$, во втором и третьем — $\sin \alpha_2 = \sin \alpha_3 = \sqrt{3/7}$ и $\alpha_2 = \alpha_3 \approx 41^\circ$. Последние два случая согласуются с данными Р. Е. Хортона (1948).

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 22 апреля 1980 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Трофимов А. М. Основы аналитической теории развития склонов. Казань, 1974. 212 с.
Физико-географическое районирование Среднего Поволжья (под ред. А. В. Ступина). Казань, 1964. 197 с.
Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М., ИЛ, 1948. 156 с.
Foster G. R., Meyer L. D. Transport of soil particles by shallow flow.— Trans. ASAE, 1972, v. 15, N 1, p. 156—162.