

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ СТОКОРЕГУЛИРУЮЩИМИ  
РУБЕЖАМИ В ПРОЕКТАХ ПОЧВОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ  
ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

С. В. Будник

*Національний аграрний університет*

**ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНЕЙ МІЖ СТОКОРЕГУЛЮВАЛЬНИМИ РУБЕЖАМИ  
В ПРОЕКТАХ ҐРУНТОЗАХИСНОЇ СИСТЕМИ ЗЕМЛЕРОБСТВА**

Розглядаються питання визначення місць на схилі, де найбільш доцільно розташовувати стокорегулювальний рубіж. Наводиться алгоритм розрахунку.

*Ключові слова: стік, злив, концентрація стоку, рубіж.*

S. V. Budnik

*National agrarian university, s. Kyiv*

**DEFINITION OF THE DISTANCES BETWEEN IMPOUNDING BOUNDARIES IN THE AREA  
OF THE SOIL CONSERVATION AGRICULTURE SYSTEM'S PROJECTS**

The problem of definition of the places on a slope to set impounding boundary are being considered in the present work. The algorithm of such an estimations is also given.

*Keywords: flow, loss, concentration of a drain, a boundary.*

К стокорегулирующим рубежам относят границы полей севооборотов, водозадерживающие и водоотводящие валы, валы-канавы, террасы и лесные полосы.

В существующих рекомендациях расстояния между стокорегулирующими рубежами определяются в зависимости от скоростей стекания или объема стока (Белопольский, 1990 и др.) и в зависимости от объема смываемой почвы со склонов (Инструкция ..., 1979; Указания по проектированию ..., 1977). Последний способ считается (Срибный, 1990) наиболее обоснованным, так как позволяет сразу оценивать результаты почвозащитной системы земледелия и эффективность различных мероприятий.

Расчеты ведутся либо путем определения расстояния, при котором смыв почвы превышает допустимый, либо путем сравнения объема стока с объемом воды, который способно задержать планируемое сооружение. Однако можно использовать и такой показатель, как глубина размыва. Так, согласно выдвинутому ранее требованиям (Будник, 2002 и др.) первое сооружение от водораздела должно быть расположено выше места начала концентрации стока, где размыва нет. Для решения данной задачи необходимо прежде всего разбить склон на соответствующие зоны и провести расчет их границ. Ранее частично схема и алгоритм решения приводились в работах Будник С. В. (2005) и др.

Согласно схеме дифференциации склона по характеру эрозионных форм и факторам, определяющим размыв, склон по длине можно разбить на несколько зон: 1) зона концентрации стока, здесь размывов не наблюдается, 2) зона начала размыва, здесь наблюдается постепенное увеличение глубины размоины по длине склона, 3) зона отложения наносов, здесь наблюдается уменьшение глубины размыва вниз по склону до полного ее отсутствия и отложения наносов, 4) зона критического размыва, здесь происходит катастрофический размыв грунта. За зоной критического размыва идет чередование зоны отложения наносов и зоны критического размыва. Границы зон динамичны и зависят от условий формирования стока. Данная схема идеальна, в природе частота и амплитуда колебаний глубины размыва изменяются от года к году и от ливня к ливню в зависимости от условий формирования стока.

В зоне начала размыва преимущественное влияние на размыв оказывает химическая составляющая, в зоне отложения наносов – динамическая. Для зоны критического размыва мы можем констатировать значительное изменение как мутности воды,  $pH$  воды, так и изменение содержания практически всех элементов в воде. В этой зоне и химическая, и динамическая составляющие являются одинаково значимыми.

Для прогнозирования мест на склоне, где наиболее вероятен размыв почвы, целесообразно воспользоваться методами оптимизации (математического программирования). В качестве целевой функции, состоящей из отрезков вышеперечисленных зон, можно принять продольную площадь размыва склона. При ее оптимизации на максимум определяются места на склоне, где будет наблюдаться интенсивный размыв почвы. При ее оптимизации на минимум определяются места на склоне, где размывов не будет. Тогда продольная площадь размыва ( $W$ ) будет определяться целевой функцией

$$W = C_1L_v + C_2L_o + C_3L_{ot} + n(C_4L_{кр} + C_5L_{ot}) \rightarrow \min(\max).$$

Система ограничений включает следующие уравнения:

- |   |   |
|---|---|
| 1) ограничение по длине склона:<br>$L_v + L_o + L_{ot} + n(L_{кр} + L_{ot}) = L_s$ ;                          | 5) $0 \leq C_3 \leq h_{m1}$ ;   |
| 2) ограничение по глубине базиса эрозии:<br>$L_v + C_2L_o + C_3L_{ot} + n(C_4L_{кр} + C_5L_{ot}) \leq HL_s$ ; | 6) $C_4 = h_{m2}$ ;   |
| 3) $C_1 = 0$ ;  | 7) $0 \leq C_5 \leq h_{m2}$ ;   |
| 4) $0 \leq C_2 \leq h_{m1}$ ;   | 8) ограничение по транспортирующей способности потока:<br>$C_4L_{кр} - C_5L_{ot} \approx 0$ , |

где  $C_i$  – коэффициенты, соответствующие по физическому смыслу осредненной максимальной глубине размыва на участке;  $n$  – число периодов чередования зон критического размыва и отложения наносов, зависит от длины склона, количества и интенсивности осадков, агрофона и т. п.;  $L_s$  – длина склона;  $H$  – падение склона;  $h_{m1}$  – максимальная глубина размыва в зоне, соответствующей начальной длине размыва, переменная величина, зависящая от химического состава воды, динамики потока, характеристик подстилающей поверхности и др.;  $h_{m2}$  – максимальная величина размыва в зоне критического размыва, также переменная величина, зависящая от динамики потока, гранулометрического состава почвы, химического состава воды и др.

Данная система уравнений содержит три неизвестных, определяемых эмпирическим путем ( $n, h_{m1}, h_{m2}$ ).

В частности, число периодов можно определить по следующей формуле:

$$n = X_1X_2X_3X_4X_5;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 10,04 + 7,52 \times 10^{-7} L_s^{3,0}; & X_4 &= 0,8378 + 0,0004172 I_{max} + 222,9 / I_{max}^2; \\ X_2 &= 1,078 I_{min} / (0,01166 + I_{min}); & X_5 &= 0,9771 + 0,00922 af, \\ X_3 &= 1,179 - 0,001916 T_{nn}^{3,0}; \end{aligned}$$

где  $I_{max}$  – максимальный уклон на склоне, ‰;  $I_{min}$  – минимальный уклон на склоне, ‰;  $T_{nn}$  – разновидность почвогрунтов (3 – чернозем обыкновенный на лессе, 5 – чернозем обыкновенный на мергеле, 4 – чернозем обыкновенный на песках, 6 – мергели);  $af$  – агрофон (1 – пар (зять, для снеготаяния), 4 – естественное кормовое угодье, многолетние травы).

$$E = 3,003 \%; E_1 = 0,117; r = 0,999; s/\sigma = 0,049.$$

Максимальную глубину воды ( $h_{max}$ , м) в склоновых водотоках, сформировавшихся при снеготаянии, можно определить по следующей эмпирической зависимости:

$$h_{max} = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,04742 L_s / (89,09 + L_s); & X_6 &= 1 / (1,603 - 0,03258 I_p + 0,0003012 I_p^2); \\ X_2 &= 1 / (106,8 - 29,65 p H n + 2,071 p H n^2); & X_7 &= 1,02 NO_3 n / (0,0002629 + NO_3 n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X_3 &= 1/(1,519 - 0,3286z_0 + 0,0375z_0^2); & X_8 &= 1/(1,034 - 351700 \exp(-0,4985Wn)); \\
X_4 &= 1/(0,9581 - 0,008324Nan + & X_9 &= 1/(-0,1211 + 0,01266XS - \\
& 0,0006553Nan^2); & & - 0,00003358XS^2), \\
X_5 &= 1/(1,848 - 0,07068Ic + 0,0009172Ic^2);
\end{aligned}$$

где  $Ls$  – длина склона от водораздела до створа измерения, м;  $Ic$  – уклон склона, ‰;  $pHn$  – кислотность поверхностного (0–3 см) слоя почвы;  $z_0$  – глубина оттаивания почвы;  $Nan$  – содержание натрия в верхнем (0–3 см) слое почвы, мг/100 г;  $lp$  – глубина промерзания почвы, см;  $NO3n$  – содержание нитратов в верхнем 0–3 см слое почвы, мг/100 г;  $Wn$  – влажность почвы;  $XS$  – количество осадков за осенне-зимний период (ноябрь–март).

Относительная ошибка модели  $E = 22,0$  ‰, абсолютная ошибка модели  $E_1 = 0,001$  м, коэффициент корреляции  $r = 0,88$ , критерий качества модели  $s/\sigma = 0,48$ .

При ливнях особенности агрофонов определяют наличие различий в значимостях тех или иных факторов при определении максимальной глубины воды. Максимальную глубину воды в склоновых водотоках, формирующихся при ливнях, можно определить по следующей эмпирической зависимости:

для пара

$$h_{\max} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10};$$

$$\begin{aligned}
X_1 &= 1/(4668 - 267,2Wn + 3,851Wn^2); & X_6 &= 0,4909i_{\max}^{-0,3854} \exp(0,8199i_{\max}); \\
X_2 &= 1/(0,9773 + 1,225d_{cp} - 3,492d_{cp}^2); & X_7 &= 1,035Ls^{0,009268} \exp(-0,00218Ls); \\
X_3 &= 1/(0,9781 + 26,6 \exp(-0,3077prx)); & X_8 &= 1/(1,068 - 11070 \exp(-15,5pn)); \\
X_4 &= 1/(4,258 - 22,66So + 38,81So^2); & X_9 &= 0,2131Ic^{0,467} \exp(-0,005333Ic); \\
X_5 &= 1/(1,061 - 0,00251bp); & X_{10} &= 0,9666X^{0,014},
\end{aligned}$$

где  $Ls$  – длина склона от водораздела до створа измерения, м;  $Ic$  – уклон склона, ‰;  $h_{\max}$  – максимальная глубина воды, м;  $tv$  – температура воздуха, °C;  $io$  – интенсивность осадков в момент измерения стока, мм/мин;  $d_{cp}$  – средний диаметр почвенных частиц (сухое просеивание), мм;  $prx$  – продолжительность выпадения осадков, мин;  $X$  – количество осадков, мм;  $i_{\max}$  – максимальная интенсивность осадков, мм/мин;  $So$  – критерий Траска-Крумбейна;  $bp$  – время от начала выпадения осадков до момента измерения, мин;  $pn$  – плотность почвы, г/см<sup>3</sup>.

$$E = 16,7 \text{ ‰}; E_1 = 0,001 \text{ м}; r = 0,965; s/\sigma = 0,26;$$

для многолетних трав

$$h_{\max} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7;$$

$$\begin{aligned}
X_1 &= 0,02582 - 0,00002245Ls + 9,754/Ls^2; & X_5 &= 1,066 - 0,0003419So^{-4,0}; \\
X_2 &= 0,5971 + 7,162io - 12,03io^2; & X_6 &= 1,056 - 0,000001646Wn^{3,0}; \\
X_3 &= 1,374 - 0,4718d_{cp} - 0,006346/d_{cp}^2; & X_7 &= 1,185i_{\max}^{0,08039} \exp(-0,1932i_{\max}). \\
X_4 &= 1,779 - 0,01676bp + 0,0000695/bp^2;
\end{aligned}$$

$$E = 12,4 \text{ ‰}; E_1 = 0,001 \text{ м}; r = 0,96; s/\sigma = 0,27.$$

для пропашных

$$h_{\max} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8;$$

$$\begin{aligned}
X_1 &= -0,0007194 + 0,06675bp^{-0,5}; & X_5 &= 0,8846 + 0,003914X + 4,883/X^2; \\
X_2 &= 1/(1,349 - 0,00391Ic - 0,00001676Ic^2); & X_6 &= 1,007 - 6,544 \times 10^{-22}io^{-4,0}; \\
X_3 &= 1/(0,9487 + 23530 \exp(-11,76pn)); & X_7 &= 1,017 - 81,32Ls^{-4,0}; \\
X_4 &= 0,9945 + 0,2952d_{cp} - 0,0003812/d_{cp}^2; & X_8 &= 0,9666 + 0,0002421So^{-4,0}.
\end{aligned}$$

$$E = 9,87 \text{ ‰}; E_1 = 0,000 \text{ м}; r = 0,99; s/\sigma = 0,136;$$

для естественного кормового угодья

$$h_{\max} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,01946 + 0,0001087T_{\text{nn}}; & X_2 &= 0,5498 + 4,655i_o - 1,402i_o^2; \\ X_3 &= 2,946 - 0,007968Ic - 13120/Ic^2; & X_4 &= 0,7902 + 0,05865X^{0,5}; \\ X_5 &= 3,704 - 0,6948pn - 2,346/pn; & X_6 &= 0,783bp^{0,07257} \exp(-0,001191bp); \\ X_7 &= -0,06967 + 0,07413Wn - & X_8 &= 1,016 \exp(-0,01318/i_{\max}); \\ & 0,001126Wn^2; & & \\ X_9 &= 0,8455d_{\text{cp}}^{-0,1156} \exp(0,121d_{\text{cp}}); & X_{10} &= 0,9843 \exp(2,031/Ls). \\ E &= 29,6\%; E_1 = 0,001 \text{ м}; r = 0,89; s/\sigma = 0,45; \end{aligned}$$

для полевой дороги

$$h_{\max} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,05787 - 0,6707i_{\max} + 1,264i_{\max}^2; & X_5 &= 1,03 - 0,01271 \log X; \\ X_2 &= 1,682 - 0,002193bp - 43,68/bp; & X_6 &= 0,9949 + 0,0001046Ic; \\ X_3 &= 0,9118 + 0,001613Ls; & X_7 &= 0,9857 + 0,001199Wn - \\ & & & - 0,00002472Wn^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_4 &= 1,022 - 3,466i_o + 47,36i_o^2; \\ E &= 4,77\%; E_1 = 0,000 \text{ м}; r = 0,95; s/\sigma = 0,33; \end{aligned}$$

для зерновых колосовых

$$h_{\max} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 1/(109,1 - 117,3i_o + 36,39i_o^2); & X_6 &= 1/(9,038 - 170,4d_{\text{cp}} + 893,5d_{\text{cp}}^2); \\ X_2 &= 1/(0,4764 + 0,01823Ls - & X_7 &= Ic/(-2,076 + 1,105Ic); \\ & - 0,0001139Ls^2); & & \\ X_3 &= 1/(2,504 - 0,08815bp + 0,001088bp^2); & X_8 &= 1/(2,099 - 2,288pn + 1,13pn^2); \\ X_4 &= 1/(0,9714 + 691,7 \exp(-0,8026Wn)); & X_9 &= 1/(0,9713 - 0,007843i_{\max} + \\ & & & 0,01908i_{\max}^2). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_5 &= 1/(4,784 - 20,77So + 27,94So^2); \\ E &= 7,28\%; E_1 = 0,000 \text{ м}; r = 0,995; s/\sigma = 0,0995. \end{aligned}$$

Поскольку процесс размыва и аккумуляции динамичен и места наибольших размывов и отложений меняются в зависимости от количества осадков, их интенсивности, агрофона и т. п., необходимо проводить серию расчетов для выявления зон наиболее вероятного размыва и отложения наносов. Кроме того, при длительном периоде стока зоны размывов имеют тенденцию регрессивно передвигаться по потоку (Краснов, 1987), что также может быть учтено эмпирически при последовательном пересчете.

Местом же размещения первого сооружения будет точка выше верхней границы возможного начала размыва. Место начала размыва можно также вычислить согласно Медведеву, Булыгину (1989) и др.

Расстояния между последующими сооружениями на склоне следует рассчитывать с учетом изменения мутности и расхода воды по длине склона и с учетом объема прудка при сооружении, а также допустимого смыва на участке. Однако если исходить из предпосылок существующих на сегодняшний день методик, то для расчета последующих расстояний между сооружениями можно использовать ту же формулу, что и для определения местоположения первого сооружения от водораздела, полагая, что верхнее сооружение служит водоразделом для оставшейся части склона и расчет ведется от нового водораздела.

Предложенный метод более динамичен и учитывает прерывность процесса, в отличие от имеющихся. Привязка к длине склона позволяет использовать его при создании проектов землепользования с применением ГИС-технологий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

**Белолипский В. А.** Методические указания по определению потенциального стока с элементарных водосборов и проектированию почвоводоохранных мероприятий при контурно-мелиоративном земледелии / В. А. Белолипский и др. – Луганск: УНИИЗПЭ, 1990. – 35 с.

**Будник С. В.** Некоторые принципы размещения противозрозионных сооружений на склонах с учетом их пространственной устойчивости // *Агрохімія і ґрунтознавство*. – 2002. – Вип. 63. – С. 103-110.

**Буднік С. В.** Прогнозування ерозійно та екологічно небезпечних ситуацій в агроландшафтах // *Зб. тр. ІЗ УААН. Спецвипуск*. – К., 2005. – С. 38-41.

**Инструкция** по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозрозионных мероприятий на Европейской территории СССР. – Ленинград: Гидрометиздат, 1979. – 62 с.

**Краснов С. Ф.** Определение смыва при поливе по бороздам // *Земледелие*. – 1987. – № 5. – С. 54-57.

**Медведев В. В.** Конструирование культурного агроландшафта / В. В. Медведев, С. Ю. Бульгин // *Земледелие*. – 1989. – № 2. – С. 45-50.

**Срібний Г. К.** Деякі особливості проектування водоперехоплюючих валів та задернованих водостоків для боротьби з ерозією ґрунтів // *Вісник с.-х. науки*. – 1980. – № 10. – С. 72-75.

**Срибный И. К.** Определение расстояний между стокорегулирующими рубежами в проектах почвозащитной системы земледелия с контурно-мелиоративной организацией территории / И. К. Срибный, В. А. Вергунов // *Вестник с.-х. науки*. – 1990. – № 3. – С. 117-120.

**Указания** по проектированию валов-террас при землеустройстве. – М.: МСХ СССР, 1977. – 72 с.

*Надійшла до редколегії 27.05.06*