

С. В. Будник

## ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛИВНЯХ

С. В. Будник

*Український гідрометеорологічний інститут, м.Київ*

### ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК ПІДСТЕЛЯЮЧОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ЗЛИВАХ

Розглядаються питання, пов'язані з мінливістю у часі та просторі характеристик атмосферних опадів та підстеляючої поверхні, що забезпечують стік та змив зі схилів. Пропонуються емпіричні залежності визначення зміни характеристик підстеляючої поверхні при зливах.

*Ключові слова: стік, злива, вологість ґрунту, гранулометричний склад.*

S. V. Budnik

*Ukrainian Research Hydrometeorological Institute, c. Kiev*

### TRACK RECORD OF THE FEATURES UNDERLYING SURFACES AT RAINSTORM

In work are considered questions, connected with variability at time and space of the features underlying surfaces providing flow and loss with slope. They Are Offered empirical dependencies of the determination of the change the features underlying surfaces at rainstorm.

*Keywords: flow, rainstorm, moisture of ground, granulation composition.*

Формирование стока и смыва на склонах, как известно, обеспечивается рядом факторов, ведущими среди которых являются характеристики атмосферных осадков и подстилающей поверхности. Их изменчивость во времени и пространстве определяет величину стока и смыва со склонов (Мирицзулава, 1988; Горчичко, 1979; Богданов, Сластихин, 1973 и др.). В свою очередь, под воздействием атмосферных осадков, стока и смыва свойства почв также подвергаются изменениям (Гарифуллин, Федоров, 1997 и др.). Важность и многоплановость влияния и взаимодействия факторов, определяющих сток и смыв, нашли отражение в многочисленных исследованиях. Прорабатывались как вопросы о характере атмосферных осадков и возможности прогнозирования их характеристик, так и вопросы, касающиеся пространственной вариабельности и временной изменчивости характеристик подстилающей поверхности.

#### *Анализ предшествующих исследований*

Исследования Е. А. Дмитриева и А. В. Николаенко (1996) показали, что пространственная организованность влажности почвы может существенно различаться в различные моменты времени для одного и того же слоя почвы. Также выявлено, что под лесом дисперсия влажности заметно выше, чем в поле. Наибольшая неоднородность полей влажности почвы верхнего (0–20 см) слоя почвы отмечена для мая–июня (Конторщиков, 1979).

Согласно В. Я. Григорьеву и А. В. Бобкову (1997) увлажненность почв определяет их противозерозионную стойкость. В работе «Ливневая эрозия черноземов в посевах кукурузы при разной основной обработке» (Ивонин и др., 1993) приводятся зависимости коэффициента стока от времени размочания почвенных образцов, содержания гумуса, водопрочных агрегатов, объемной массы почвы и наземной массы кукурузы.

Известна взаимосвязь плотности и влажности почвы. Е. М. Гусевым (1978) показано влияние интенсивности дождя на интенсивность фильтрации.

В. А. Шутовым (1995) предложен вероятностный метод расчета пространственного распределения влажности и проницаемости почв на водосборе, при котором считается, что стокообразование происходит при превышении влажностью почвы наименьшей влагоемкости и коэффициенте фильтрации, не превосходящем 0,02 мм/мин (последнее условие для верхнего слоя почвы 0–5 см в их исследованиях не соблюдалось).

Согласно данным С. Н. Тайчикова и М. М. Файзуллина (1958) влажность почвы заметно отличается по экспозиции и протяженности склонов. На северных склонах увлажненность выше. С удалением от водораздела и нарастанием уклона она уменьшается, на нижней части склонов снова значительно увеличивается. Такая динамика сохраняется в течение всего вегетационного периода.

#### *Постановка задачи*

Анализ многочисленных литературных источников и результатов натурных наблюдений (Будник, 2004) показывает, что характеристики стока и смыва со склонов определяются характеристиками атмосферных осадков, их изменчивостью в пространстве и по времени и изменчивостью характеристик подстилающей поверхности (влажности, плотности почвы, ее гранулометрического состава и др.). В свою очередь, изменчивость характеристик подстилающей поверхности зависит от изменчивости характеристик атмосферных осадков. Наши исследования показали, что сток при ливнях формируется значительно раньше, чем влажность верхнего слоя почвы достигнет наименьшей влагоемкости. Даже на свежеспаханной поверхности при выпадении осадков высокой интенсивности в первые минуты ливня на поверхности почвы образуется уплотненная корка вследствие как раздробления почвенных частиц каплями дождя, так и их пептизации и диспергирования в результате поступления слабоминерализованной воды в почву (Пачепский, Зейлигер, 1989). Глубина промачивания за время выпадения ливня невелика (1–2 см). По нашим данным, у 70 % из наблюдаемых ливней максимум интенсивности приходился на первую половину дождя. При ливнях значительной интенсивности с максимумом интенсивности в начале ливня увлажнение почвы ниже, плотность почвы выше, раздробление частиц выше, чем у менее интенсивных ливней и ливней с максимумом во второй половине периода выпадения осадков.

В связи с вышесказанным исследование изменчивости характеристик подстилающей поверхности во времени и в пространстве во время ливней приобретает особую актуальность в свете решений задач, связанных с прогнозом паводков и проектированием сооружений на склонах.

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Нами проводились наблюдения за стоком и смывом при естественных ливнях в Луганской (Лутугинский и Краснодонский р-ны) и Киевской областях (Бориспольский р-н). Почвы исследуемых участков: чернозем обыкновенный на лессах, песках и мергелях, мергели, серые лесные почвы. В *таблице* представлены характеристики атмосферных осадков и подстилающей поверхности, при которых формировался сток на склонах. Всего было исследовано 25 дождей, при которых формировался сток в различные по водности и засушливости годы (1997–2003 гг.).

Проведенные исследования позволяют нам предложить зависимости для определения изменения характеристик подстилающей поверхности в период выпадения ливня. Определяющим фактором здесь является агрофон, от его характера изменяется степень влияния факторов в зависимостях. В течение дождя характер увлажнения, уплотнения почвы изменяются, изменяется и раздробленность почвенной структуры. Это нашло отражение в эмпирических зависимостях. На исследуемые величины влияют интенсивность осадков (как максимальная, так и мгновенная), а также общая

продолжительность осадков и промежутков времени от начала дождя до определенного момента времени. Зависимости построены методом Брандона (последовательного исключения факторов), порядок следования факторов в модели определяет их значимость.

**Характеристики дождей и подстилающей поверхности при измерениях характеристик стока воды и наносов на склонах**

| Показатель   | Агрофон    |                    |                   |                              |                    |                |
|--|------------|--------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|----------------|
|  | Пар        | Пропашные культуры | Многолетние травы | Естественное кормовое угодье | Зерновые колосовые | Полевая дорога |
| Количество осадков, мм                                 | 5,7–20,0   | 5,7–38,6           | 8–25,6            | 0,4–32,3                     | 8,7–49,6           | 8–25,5         |
| Продолжительность выпадения осадков, мин               | 15–65      | 15–225             | 65–415            | 5–569                        | 23–108             | 186–415        |
| Максимальная интенсивность осадков, мм/мин             | 0,18–0,6   | 0,05–0,86          | 0,4–0,57          | 0,18–0,99                    | 0,48–1,73          | 0,066–0,45     |
| Влажность поверхностного слоя почвы, %                 | 27,7–40,3  | 16,7–35,3          | 24,9–35,9         | 19,8–39,3                    | 19,66–24,92        | 19,14–27,54    |
| Плотность поверхностного слоя почвы, г/см <sup>3</sup> | 0,75–1,29  | 0,96–1,7           | 1,08–1,42         | 1,13–1,86                    | 1,02–1,29          | 1,29–1,41      |
| Средний диаметр почвенных частиц, мм                   | 0,25–0,48  | 0,083–0,5          | 0,115–1,13        | 0,25–2,05                    | 0,088–0,113        | 0,5–1,7        |
| Критерий Траска-Крумбейна                              | 0,23–0,342 | 0,218–0,548        | 0,224–0,451       | 0,142–0,392                  | 0,299–0,47         | 0,218–0,34     |

➤ **Влажность почвы на склоне во время ливня можно определить по следующим зависимостям**

1. Для пара

$$Wn = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11} X_{12};$$

$$X_1 = 62,38 - 3,347tvd + 0,08853tvd^2;$$

$$X_2 = 0,8317 + 0,004049bp + 17,65/bp^2;$$

$$X_3 = 1,13 - 0,1349i_{\max} - 0,009356/i_{\max}^2;$$

$$X_4 = 0,5587 + 0,01581Ic - 0,0001348Ic^2;$$

$$X_5 = 0,682prx^{0,1455} \exp(-0,003486prx);$$

$$X_6 = 1,602 - 4,269So + 7,456So^2;$$

$$X_7 = 1/(0,9951 + 0,1684i_0 - 0,3253i_0^2);$$

$$X_8 = 1,003 - 9,688Ls^{-4,0};$$

$$X_9 = 1,022 - 0,001231X - 0,3563/X^2;$$

$$X_{10} = 1,072 - 0,009404tv + 0,0003005tv^2;$$

$$X_{11} = 0,9939 + 0,06878i_{\text{cp}} - 0,1453i_{\text{cp}}^2;$$

$$X_{12} = 0,9898 + 0,0007966Wnd -$$

$$- 0,00001425Wnd^2,$$

где  $Wn$  – влажность почвы, %;  $tvd$  – температура воздуха перед ливнем, °C;  $So = \sqrt{d_{25}/d_{75}}$  – критерий однородности частиц по Траску-Крумбейну,  $d_{25}$  – диаметр частиц, обеспеченность содержания которых составляет 25 %,  $d_{75}$  – диаметр частиц, обеспеченность содержания которых составляет 75 %;  $X$  – количество осадков за дождь, мм;  $prx$  – продолжительность выпадения осадков, мин;  $i_0$  – интенсивность осадков в заданный момент времени, мм/мин;  $bp$  – время от начала выпадения дождя, мин;  $tv$  – температура воздуха, °C;  $i_{\max}$  – максимальная интенсивность осадков, мм/мин;  $Ls$  – длина склона, м;  $i_{\text{cp}}$  – средняя интенсивность осадков за ливень, мм/мин;  $Ic$  – уклон склона, ‰;  $Wnd$  – влажность почвы до ливня, %.

Относительная ошибка модели  $E = 1,57\%$ , абсолютная ошибка модели составляет  $E_1 = 0,186\%$ , коэффициент множественной корреляции  $r = 0,98$ , критерий качества модели  $s/\sigma = 0,18$ .

## 2. Для многолетних трав

$$Wn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 22,63 + 1,73d_{cp} + 2,704/d_{cp}; & X_5 &= 1,125 - 0,01934X + 0,0006155X^2; \\ X_2 &= 0,9003 + 0,0005259So^{-4,0}; & X_6 &= 1,091 - 0,001722Ls + 4,919 \times 10^{-6}Ls^2; \\ X_3 &= 4,559 - 1,918pn - 1,761/pn^2; & X_7 &= 1,031 - 0,001237Wnd - 0,3946/Wnd^2; \\ X_4 &= 1,246 - 0,005623Ic + 0,00002645Ic^2; & X_8 &= 0,0000 + 1,408 \times 10^{-8}i_{max}^{-4,0}, \end{aligned}$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр почвенных частиц верхнего (0–3 см) слоя почвы, мм, определяется при сухом просеивании проб почвы, отобранных без нарушения структуры образца (как при определении плотности почвы);  $pn$  – плотность почвы, г/см<sup>3</sup>.

$$E = 2,85\%; E_1 = 0,39\%; r = 0,97; s/\sigma = 0,24.$$

## 3. Для пропашных культур

$$Wn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}X_{11}X_{12};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 49,55 - 4,788Wnd + 0,1721Wnd^2; & X_7 &= 1/(0,9246 + 0,01047tvd - 0,0003091tvd^2); \\ X_2 &= 2,77 - 0,08269tv - 105,1/tv^2; & X_8 &= 0,9979 + 14,27X^{-4,0}; \\ X_3 &= 1/(1,241 - 0,0358Ls + 0,001057Ls^2); & X_9 &= 1,007 - 2,766 \times 10^{-8}Ic^{3,0}; \\ X_4 &= 1,019 - 1390bp^{-4,0}; & X_{10} &= 1,012 - 0,07944i_{cp} + 0,08447i_{cp}^2; \\ X_5 &= 1,022 + 0,07405i_{max} - 0,1562i_{max}^2; & X_{11} &= 0,9969 + 0,06056So^{3,0}; \\ X_6 &= 1,011 - 0,1925i_o + 0,2627i_o^2; & X_{12} &= 1,001 - 3,205 \times 10^{-10}prx^{3,0}. \end{aligned}$$

$$E = 0,62\%; E_1 = 0,052\%; r = 0,999; s/\sigma = 0,026.$$

## 4. Для естественного кормового угодья

$$Wn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}X_{11}X_{12};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 58,88 - 91,81So - 0,3388/So^2; & X_8 &= 0,9567 + 0,0001553prx + 2,451/prx^2; \\ X_2 &= 0,8812 + 0,0001421Ls + 11,5/Ls; & X_9 &= 1,957 - 1,577pn + 0,6321pn^2; \\ X_3 &= 1,261 - 0,9552d_{cp} + 0,4742d_{cp}^2; & X_{10} &= 1,37 - 0,03908tvd + 0,0009858tvd^2; \\ X_4 &= 0,5403 + 0,001296Ic + 6118/Ic^2; & X_{11} &= 0,8912 + 0,01554Wnd - \\ & & & - 0,0003799Wnd^2; \\ X_5 &= 0,9056 + 0,001248bp - 0,000001738bp^2; & X_{12} &= 1,006 - 0,002585i_{max}^{-0,5}. \\ X_6 &= 0,8845 + 0,004224X + 0,1218/X; \\ X_7 &= -5,954 + 2,756pnd + 4,335/pnd; \end{aligned}$$

$$E = 9,25\%; E_1 = 0,399\%; r = 0,878; s/\sigma = 0,48.$$

## 5. Для зерновых колосовых

$$Wn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}X_{11}X_{12};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= -231,1 + 26,03tv - 0,6651tv^2; & X_8 &= 0,9356 + 0,4465d_{cp} + 0,0001928/d_{cp}^2; \\ X_2 &= 1,065i_o^{0,007754} \exp(-0,09342i_o); & X_9 &= 1/(0,9997 + 26,18 \exp(-3,049Wnd)); \\ X_3 &= 1,152 - 0,003637Ls + 0,00001653Ls^2; & X_{10} &= 1,003 - 0,0002151Ic + 3,638 \times 10^{-6}Ic^2; \\ X_4 &= 0,9924 + 8,618 \times 10^{-8}bp^{3,0}; & X_{11} &= 0,9973 + 0,005616i_{max} - \\ & & & - 0,002342i_{max}^2; \\ X_5 &= 1/(0,9953 + 52280 \exp(-14,49pn)); & X_{12} &= 1,0 - 8,212 \times 10^{-7}/X. \\ X_6 &= tvd/(-0,1685 + 1,007tvd); \\ X_7 &= 1/(0,9996 + 499,6 \exp(-42,55So)); \end{aligned}$$

$$E = 0,16\%; E_1 = 0,01\%; r = 1,0; s/\sigma = 0,0079.$$

➤ **Плотность почвы можно определить по следующим зависимостям.**

### 1. Для пара

$$pn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 1,715 - 0,01382prx - 104,4/prx^2; & X_6 &= 1/(1,001 - 172,3 \exp(-0,274Ic)); \\ X_2 &= 1,142 - 0,00375bp - 12,99/bp^2; & X_7 &= 0,9964 + 0,0001661X + 0,08779/X^2; \\ X_3 &= -0,2388 + 3,067So + 0,02814/So^2; & X_8 &= 0,9981 + 0,04324d_{cp}^{3,0}; \\ X_4 &= 1/(0,9966 + 1098 \exp(-0,995tv)); & X_9 &= 1/(1,0 - 0,0273 \exp(-0,5747Wnd)). \\ X_5 &= 1,006 - 9,094 \times 10^{-8}Ls^{3,0}; \end{aligned}$$

$$E = 0,637 \%; E_1 = 0,002 \text{ г/см}^3; r = 0,999; s/\sigma = 0,0496.$$

### 2. Для многолетних трав

$$pn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= -7,84 + 0,3383 + 923,4/tv^2; & X_6 &= 1/(0,8162 + 1,142So - 1,646So^2); \\ X_2 &= 0,895 + 0,003839Ic - 0,00002352Ic^2; & X_7 &= 0,9977 + 4,971 \times 10^{-6}d_{cp}^{-4,0}; \\ X_3 &= 0,9843 + 0,003992Wnd - & X_8 &= 0,9629 + 0,006792X - 0,0002364X^2; \\ & - 0,0001239Wnd^2; & X_9 &= 1,002 - 158800prx^{-4,0}; \\ X_4 &= 1,017 - 0,5408i_0 + 1,52i_0^2; & X_{10} &= 0,9986 + 20540bp^{-4,0}. \\ X_5 &= 1,008 + 3,796 \times 10^{-6}Ls - 44,14/Ls^2; \end{aligned}$$

$$E = 2,40 \%; E_1 = 0,01 \text{ г/см}^3; r = 0,945; s/\sigma = 0,326.$$

### 3. Для пропашных культур

$$pn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= -0,9886 + 1,437pnd + 0,6028/pnd^2; & X_6 &= 0,9565 + 0,2898So - 0,4415So^2; \\ X_2 &= 0,9517 + 0,5336i_0 - 0,6338i_0^2; & X_7 &= 1/(1,093 - 0,01386tv + 0,0004993tv^2); \\ X_3 &= 1,07 - 0,001639X - 4,566/X^2; & X_8 &= 0,9831 + 0,0001062prx + 0,241/prx; \\ X_4 &= 1,006 - 26,6Ls^{-4,0}; & X_9 &= 0,9877 + 0,0001659Ic + 5,673/Ic^2; \\ X_5 &= 1/(1,017 - 0,0004911bp + 2,23 \times 10^{-6}bp^2); & X_{10} &= 1,002 - 0,00319i_{max}^{0,5}, \end{aligned}$$

где  $pnd$  – плотность почвы до дождя,  $\text{г/см}^3$ .

$$E = 1,15 \%; E_1 = 0,005 \text{ г/см}^3; r = 0,996; s/\sigma = 0,088.$$

### 4. Для естественного кормового угодья

$$pn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}X_{11}X_{12}X_{13};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 1,831 - 0,001414Ic - 6057/Ic^2; & X_8 &= 0,9879 + 0,05615d_{cp} - 0,03834d_{cp}^2; \\ X_2 &= 0,7186 + 0,008618Wnd + 8,11/Wnd^2; & X_9 &= 0,9882 + 0,0002213bp - 4,185 \times 10^{-7}bp^2; \\ X_3 &= 1/(0,9571 + 0,421i_{max} - 0,4212i_{max}^2); & X_{10} &= 0,6819 + 0,03348tv - 0,0008475tv^2; \\ X_4 &= 1,015 - 42410Ls^{-4,0}; & X_{11} &= 1,014 - 0,0007331X - 0,004247/X^2; \\ X_5 &= 1,627 - 1,29pnd + 0,6159pnd^2; & X_{12} &= 0,9709 + 0,001347tvd + 1,482/tvd^2; \\ X_6 &= 0,9577 + 0,004296So^{-1,5}; & X_{13} &= 0,9992 + 0,0007223prx^{0,02}. \\ X_7 &= 0,9998 - 0,06329i_0 + 3,202c10^{-12}/i_0^2; \end{aligned}$$

$$E = 4,53 \%; E_1 = 0,011 \text{ г/см}^3; r = 0,90; s/\sigma = 0,43.$$

### 5) Для зерновых колосовых

$$pn = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8X_9;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 7,125 - 0,6331tv + 0,0167tv^2; & X_4 &= -0,8003 + 12,53d_{cp} + 0,005341/d_{cp}^2; \\ X_2 &= 1/(1,04 - 0,2463i_0 + 0,1628i_0^2); & X_5 &= 0,9543 + 0,004307Ic - 0,00007913Ic^2; \\ X_3 &= 1,233 - 0,003882bp - 80,62/bp^2; & X_6 &= 0,7113 + 0,5108So + 0,01287/So^2; \end{aligned}$$

$$X_7 = 1,006 - 7,906 \times 10^{-6} prx^{1,5}; \quad X_9 = 0,9997 + 2,479 \times 10^{-6} Wnd^{3,0}.$$

$$X_8 = 0,9954 + 0,000125Ls - 6,52 \times 10^{-7} Ls^2;$$

$$E = 0,78 \%; E_1 = 0,004 \text{ г/см}^3; r = 0,99; s/\sigma = 0,13.$$

➤ **Характеристики гранулометрического состава** под действием дождя также претерпевают изменения. Средний диаметр почвенных частиц верхнего (0–3 см) слоя почвы можно определить по следующим зависимостям.

1. Для пара

$$d_{cp} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11};$$

$$X_1 = 0,2242 + 0,007599X + 2,367 \times 10^{-5} X^2; \quad X_7 = 0,8837 + 1,247i_0 - 1,852i_0^2;$$

$$X_2 = 0,7949 + 0,01779Ls - 0,0002631Ls^2; \quad X_8 = 0,684 + 0,01651tv + 12,9/tv^2;$$

$$X_3 = 2,988 - 0,02313Ic - 1834/Ic^2; \quad X_9 = 1,001 - 2,697Wnd^{4,0};$$

$$X_4 = -2,321 + 7,082pnd - 3,623pnd^2; \quad X_{10} = 0,9962 + 1876prx^{-4,0};$$

$$X_5 = 1,021 - 0,02291i_{max} - 0,001388/i_{max}^2; \quad X_{11} = 1,001 - 14,8tvd^{4,0}.$$

$$X_6 = 0,8949 + 0,002401bp + 0,8526/bp;$$

$$E = 5,12 \%; E_1 = 0,007 \text{ мм}; r = 0,95; s/\sigma = 0,32.$$

2. Для многолетних трав

$$d_{cp} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10};$$

$$X_1 = 1/(4,622 - 0,01488prx + 1,38 \times 10^{-5} prx^2); \quad X_6 = 1/(0,9463 + 0,001223bp - 5,355 \times 10^{-6} bp^2);$$

$$X_2 = 1/(2,676 - 0,05212Ic + 0,0002977Ic^2);$$

$$X_3 = 0,7869pnd^{2,257}; \quad X_7 = 1/(1,891 - 0,1086tv + 0,003245tv^2);$$

$$X_4 = 0,861Ls/(-9,619 + Ls); \quad X_8 = 1,002i_0/(3,647 \times 10^{-7} + i_0);$$

$$X_5 = 1/(1,003 - 0,3983i_{max} + 0,4991i_{max}^2); \quad X_9 = 1/(0,9974 + 776,2 \exp(-0,8264tvd));$$

$$X_{10} = X/(-0,03451 + 1,003X).$$

$$E = 7,99 \%; E_1 = 0,013 \text{ мм}; r = 0,99; s/\sigma = 0,16.$$

3. Для пропашных культур

$$d_{cp} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10};$$

$$X_1 = -1,567 + 0,7195pnd + 1,267/pnd^2; \quad X_7 = 1,011 - 0,0001229X^{1,5};$$

$$X_2 = 1/(0,9316 + 21140 \exp(-1,053tv)); \quad X_8 = 0,9998 + 7,651 \times 10^{-5} prx - 4,529 \times 10^{-7} prx^2;$$

$$X_3 = 1,579 - 0,6982i_{max} - 0,0328/i_{max}; \quad X_9 = 0,9879 + 0,001572Ic^{0,5};$$

$$X_4 = 0,9915 + 8,517 \times 10^{-22} i_0^{-4,0}; \quad X_{10} = 1,003 - 0,0001126Ls - 0,01663/Ls.$$

$$X_5 = 1,015 - 1314bp^{-4,0};$$

$$X_6 = 1/(1,008 - 5,715 \exp(-0,8187Wnd));$$

$$E = 0,298 \%; E_1 = 0,000 \text{ мм}; r = 1,0; s/\sigma = 0,0044.$$

4. Для естественного кормового угодья

$$d_{cp} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11};$$

$$X_1 = 0,7783 - 0,01546X - 0,2556/X; \quad X_7 = 2,42 - 0,05714tv - 121,6/tv^2;$$

$$X_2 = -0,4339 + 0,1959tvd - 0,006241tvd^2; \quad X_8 = 1,141 - 0,7679 i_{max} + 0,5994 i_{max}^2;$$

$$X_3 = 2,904 - 0,0227Ic + 6,173 \times 10^{-5} Ic^2; \quad X_9 = 2,539 - 0,26Tnn;$$

$$X_4 = 0,6361 + 0,04776Wnd - 0,001105Wnd^2; \quad X_{10} = 0,99 + 0,04139i_0^{0,5};$$

$$X_5 = 0,9147 + 10,96/Ls; \quad X_{11} = 0,9266 + 0,1856pnd^{4,0};$$

$$X_6 = 1,064 - 2,328 \times 10^{-4} prx - 3,331/prx^2;$$

где  $Tnn$  – разновидность почвогрунтов (3 – чернозем обыкновенный на лессе; 5 – чернозем обыкновенный на мергелях; 6 – мергели).

$$E = 31,99 \%; E_1 = 0,03 \text{ мм}; r = 0,805; s/\sigma = 0,593.$$

#### 5. Для зерновых колосовых

$$d_{cp} = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,09812 + 0,004162i_0 + 1,488 \times 10^{-12}/i_0^2; & X_6 &= 0,9798 + 0,003967Ic^{0,5}; \\ X_2 &= 1,393 - 0,00246Ls - 689,7/Ls^2; & X_7 &= 1,024 - 0,04622i_{max} + 0,01834i_{max}^2; \\ X_3 &= 3,632bp^{-0,4969} \exp(0,01259bp); & X_8 &= 1,0 + 2,118 \times 10^{-7}Wnd - 2,069 \times \\ X_4 &= 1/(0,9933 + 33400 \exp(-0,9132tv)); & & \times 10^{-8}Wnd^2. \\ X_5 &= 0,9984 + 63,28X^{-4,0}; \end{aligned}$$

$$E = 0,89 \%; E_1 = 0,000 \text{ мм}; r = 0,99; s/\sigma = 0,15.$$

➤ **Однородность частиц** по критерию Траска–Крумбейна также изменяется в зависимости от длины склона, агрофона, количества и интенсивности осадков. Зависимости связи  $So$  с определяющими факторами аппроксимируются следующим образом.

#### 1. Для пара

$$So = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,4283 - 0,3745i_{max} + 0,2059i_{max}^2; & X_7 &= 1,088 - 0,001414prx - 22,5/prx^2; \\ X_2 &= 1,008 - 29,98Ls^{-4,0}; & X_8 &= 0,9441 + 0,5011i_0 - 0,6764i_0^2; \\ X_3 &= 1,932 - 0,01079Ic - 870/Ic^2; & X_9 &= 0,9077 + 0,01113tvd - 0,0002957tvd^2; \\ X_4 &= 1,035 - 0,001924X - 0,5517/X^2; & X_{10} &= 0,8014 + 0,4218pnd - 0,215pnd^2; \\ X_5 &= 0,9333 + 0,002451bp + 1,844/bp^2; & X_{11} &= 1,001 - 0,000116Wnd + 2,393 \times \\ X_6 &= 0,007105 + 0,03246tv + 7,358/tv; & & \times 10^{-6}Wnd^2. \end{aligned}$$

$$E = 4,90 \%; E_1 = 0,005; r = 0,87; s/\sigma = 0,50.$$

#### 2. Для многолетних трав

$$So = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,04878i_{max}^{-0,8068} \exp(1,866i_{max}); & X_4 &= 1/(1,036 - 0,0008446Ic + 4,045 \times 10^{-6}Ic^2); \\ X_2 &= 1/(1,528 - 0,01024Ls + 0,00002979Ls^2); & X_5 &= 0,9996 \exp(1,582 \times 10^{-7}/i_0); \\ X_3 &= 1/(0,8794 + 0,02799X - 0,001072X^2); & X_6 &= Wnd/(-0,01572 + 1,002Wnd). \end{aligned}$$

$$E = 1,96 \%; E_1 = 0,002; r = 0,99; s/\sigma = 0,13.$$

#### 3. Для пропашных культур

$$So = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11};$$

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,4842 - 0,238pnd^{-2,5}; & X_6 &= 1,013 - 4,463 \times 10^{-6}X^{2,5}; \\ X_2 &= 1/(0,9203 + 0,003885bp - 2,163 \times \\ & \times 10^{-5}bp^2); & X_7 &= 0,9145 + 0,01113Ic^{0,5}; \\ X_3 &= 1,071 - 5,959 \times 10^{-6}Ls^{3,0}; & X_8 &= 1,007 - 0,3098/prx; \\ X_4 &= 1,292 - 0,0122Wnd - 9,162/Wnd^2; & X_9 &= 1,016 - 0,01705 i_0^{0,02}; \\ X_5 &= 1/(0,9918 + 1404 \exp(-1,053tv)); & X_{10} &= 0,9845 + 0,003843tvd^{0,5}; \\ & & X_{11} &= 1,0 - 0,00139i_{max}^{3,0}. \end{aligned}$$

$$E = 1,93 \%; E_1 = 0,003; r = 0,99; s/\sigma = 0,16.$$

#### 4. Для естественного кормового угодья

$$So = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11};$$

$$\begin{aligned}
X_1 &= 0,2456 + 0,0000455bp - 2,309/bp^2; & X_7 &= 1,034 - 0,6241i_0 + 0,8218i_0^2; \\
X_2 &= 1,114 - 1,044i_{\max} + 1,132i_{\max}^2; & X_8 &= 0,9668 + 0,00001008prx^{1,5}; \\
X_3 &= 1,645 - 0,002442Ls - 17,79/Ls; & X_9 &= 1,011 - 43,14tvd^{-3,0}; \\
X_4 &= 1,029X^{0,09644} \exp(-0,01616X); & X_{10} &= 1,127 - 0,003836Wnd - 3,732/Wnd^2; \\
X_5 &= 0,2419 + 0,007829Ic - 0,00001794Ic^2; & X_{11} &= 1,015 - 0,03856pnd^{4,0}. \\
X_6 &= 2,212 - 0,2047Tmm;
\end{aligned}$$

$$E = 16,9 \%; E_1 = 0,007; r = 0,79; s/\sigma = 0,62.$$

### 5. Для зерновых колосовых

$$So = X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8;$$

$$\begin{aligned}
X_1 &= 0,3576 - 0,009744Wnd + 0,002239Wnd^2; & X_5 &= 1,016X/(0,3555 + X); \\
X_2 &= 0,001569 + 0,006097Ls + 1788/Ls^2; & X_6 &= 1/(0,9989 + 0,015i_0 - 0,01201i_0^2); \\
X_3 &= 1,461 - 0,007975bp - 150,8/bp^2; & X_7 &= 1/(1,01 - 0,0007704Ic + 1,199 \times 10^{-5}Ic^2); \\
X_4 &= 1/(1,011 - 49230 \exp(-0,9132tv)); & X_8 &= 1/(1,0 - 0,5182 \exp(-11,56i_{\max})).
\end{aligned}$$

$$E = 1,43 \%; E_1 = 0,002; r = 0,99; s/\sigma = 0,13.$$

Для расчета по предложенным зависимостям необходимо знать характеристики дождей. Для уже выпавших дождей при наличии измерений это труда не составит, для прогнозируемых осадков задача несколько усложняется. Тем не менее существует множество работ по определению характеристик дождей, их прогнозированию. Так, согласно В. С. Навроцкой (1984) характеристики атмосферных осадков в теплый период года во многом определяются направлением перемещающихся воздушных масс. Л. Д. Михальская (1970) отмечает, что ливни и ливневые дожди отличаются большой изменчивостью во времени, максимум интенсивности чаще всего приходится на первую половину дождя (на первые 30 минут). Д. Стефенсон (1986) также считает, что наибольшая интенсивность ливня наблюдается в его начале, однако для отдельных районов возможен и сдвиг на более позднее время. Принципиальная важность этого вопроса хорошо отражена в работе Д. Стефенсона (1986): ливень, достигающий максимума в начальной стадии, может дать меньший расход воды паводка, чем ливень, достигающий максимума в более поздний момент. При проектировании же продолжительность расчетного ливня должна быть равна времени концентрации стока для водосбора при равномерном ливне и максимальном стоке любой заданной повторяемости.

В работе Д. Стефенсона (1986) также предлагаются зависимости для определения средней и мгновенной интенсивности осадков за ливень. Г. К. Сулаквелидзе с соавторами (1970) также предлагается зависимость для расчета интенсивности ливневых осадков по величине давления и удельной влажности воздуха.

В гидрологии уже стало классическим применение такой характеристики увлажнения, как индекс предшествующего увлажнения (Линслей и др., 1962; Бефани, 1969), который рассчитывается по данным о температуре воздуха и осадках, выпавших в течение предшествующего месяца. Однако конкретно для склонов, для верхнего (0–3 см) слоя почвы, который в основном участвует в стокообразовании, эта величина существенного влияния оказывать не будет. Особенно в свете наблюдаемых тенденций в изменении климата. По данным, приведенным В. Ф. Мартазиновой и Т. А. Сологуб (2000), в последние десятилетия период между образованием засушливого атмосферного процесса и почвенной засушливостью сократился, уже на пятый день верхний слой почвы существенно иссушается.



Характеристики состояния подстилающей поверхности водосбора непосредственно перед ливнем, конечно, влияют на последующее изменение состояния поверхности во время ливня, однако это влияние не одинаково для различных агрофонов, наименьшее влияние эти факторы оказывают на зерновые колосовые культуры, растущие на черноземах и на песках.

\* \* \*

На различных агрофонах степень влияния на характеристики подстилающей поверхности характеристик дождей и предшествующего ливню состояния подстилающей поверхности различна. Проведенные исследования показывают, что предложенные модели расчета характеристик подстилающей поверхности склонов можно использовать как при оперативном прогнозировании стока и смыва со склонов, так и при проектировании противоэрозионных и водопропускных сооружений на склонах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Бэфани Н. Ф.** Расчет максимальной стокообразующей интенсивности дождя // Метеорология, климатология и гидрология. – 1969. – Вып. 5. – С. 208–112.
- Богданов Х. П., Сластухин В. В.** Эродруемость почв в условиях ливневого стока // Почвоведение. – 1973. – № 9. – С. 129–131.
- Будник С. В.** Мутность воды в склоновых водотоках при ливнях // Водные ресурсы. – 2004. – № 4. – С. 431–435.
- Гарифуллин Ф. Ш., Федоров С. И.** Изменение свойств почв под действием эрозии // Почвоведение. – 1997. – № 12. – С. 1518–1520.
- Горничко Г. К.** Влияние структуры дождя и почвы на процессы эрозии // Почвоведение. – 1979. – № 2. – С. 130–134.
- Григорьев В. Я., Бобков А. В.** Оценка влияния исходной влажности на противоэрозионную стойкость рыхлых почв в период их иссушения // Вестник МГУ. – Сер. 17. Почвоведение. – 1997. – № 1. – С. 42–47.
- Гусев Е. М.** Влияние горизонтальной неоднородности коэффициента фильтрации почвы на интенсивность впитывания // Метеорология и гидрология. – 1978. – № 7. – С. 66–73.
- Дмитриев Е. А., Николаенко А. В.** Пространственно-временная неоднородность почв и погрешности экстраполяционных оценок средних значений влажности и рН // Вестник МГУ. – Сер. 17. Почвоведение. – 1996. – № 4. – С. 3–14.
- Ивонин В. М., Цветков В. П., Полуэктов Е. В.** Ливневая эрозия черноземов в посевах кукурузы при разной основной обработке // Почвоведение. – 1993. – № 6. – С. 99–107.
- Конторщикова В. И.** Статистическая структура поля влажности почвы Украины // Тр. УкрНИИГМИ. – 1979. – Вып. 171. – 119 с.
- Линслей Р. К., Колер М. А., Паулюс Д. Л. Х.** Прикладная гидрология. – Ленинград: Гидрометиздат, 1962. – 759 с.
- Мартазинова В. Ф., Сологуб Т. А.** Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX столетия // Тр. УкрНИИГМИ. – 2000. – Вып. 248. – С. 36–47.
- Мирицхулава Ц. Е.** Основы физики и механики эрозии русел. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1988. – 303 с.
- Михальская Л. Д.** Характеристики ливневых дождей степной части ЕТС // Тр. УкрНИИГМИ. – 1970. – Вып. 97. – С. 122–132.
- Навроцкая В. С.** Влияние небольших возвышенностей на осадки различного происхождения в теплый период // Метеорология, климатология и гидрология. – 1984. – Вып. 20. – С. 80–86.
- Пачепский Я. А., Зейлигер А. М.** Модели влияния состава почв на их водоудерживающую и водотранспортирующую способность // Экологические проблемы сохранения и воспроизводства почвенного плодородия. – Курск. – 1989. – С. 69–94.
- Стефенсон Д.** Гидрология и дренаж ливневых вод. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1986. – 263 с.

**Сулаквелидзе Г. К., Глушкова Н. И., Федченко Л. М.** Прогноз града, гроз и ливневых осадков. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. – 188 с.

**Тайчинов С. Н., Файзуллин М. М.** Динамика влажности почвы по элементам рельефа // Почвоведение. – 1958. – № 10. – С. 46–53.

**Шутов В. А.** Расчет инфильтрации и стока с использованием функции совместного распределения параметров почвогрунтов // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 5. – С. 97–103.

*Надійшла до редколегії 10.03.05*