

JOZEF MINÁR*, JAROSLAV HOFIERKA**

**SWAHOVÉ MODELY VODNEJ ERÓZIE PÔDY, SÚČASNÝ
STAV A PERSPEKTÍVY**

Jozef Minár, Jaroslav Hofierka: Slope models of soil water erosion: Present situation and the outlooks. *Geogr. čas.* 44, 1992, 4., 2 tables, 41 refs.

The authors attempt to present a survey and critical evaluation of the present situation and outlooks of modelling of soil water erosion. The outline of the present state of knowledge of the water erosion process is based on systematic approach that enables classification of the individual approaches to the modelling of water erosion as well as identification of the most progressive ones. Attention is concentrated especially on the short-term and large scale models built up with special observation of the aspect of their practical utilization. The most progressive and complete application model WEPP (The Water Erosion Prediction Project) based on analytical basis of the partial, physically expressible sub-processes of water erosion of soil, that is being constructed at the present moment, is analysed in detail. Other outlooks and possibilities of the development of soil water erosion modelling are mentioned as well.

I ÚVOD

System vodnej erózie pôdy (ďalej SVEP) predstavuje komplikovaný geofyzikálny systém, ktorého exaktné poznanie nie je dodnes dovŕšené. Názornejšie zhodnotenie stavu a perspektív modelovania SVEP nám umožní náčrt jeho systémového modelu zodpovedajúci súčasnému stavu poznania SVEP. Z hľadiska zadaného cieľa definujeme množinu prvkov SVEP, ktorú predstavuje prvý stĺpec tab. 1. Hlavné sekvencie z nášho hľadiska relevantných väzieb SVEP sú uvedené ako erózne subprocesy v tab. 2. Vlastnosti prvkov relevantné z hľadiska erózneho procesu sú v druhom stĺpci tab. 1. Naznačenie ďalších konkrétnych väzieb v SVEP, ktoré sú prvkami matice štruktúry SVEP, predstavujú čísla v zátvorkách tab. 1 a 2. Stupeň poznania ich mechanizmu je rôzny, väčšinu z nich sme však dnes schopní vyjadriť kvantitatívne, či už na analyticko-fyzikálnom, alebo aspoň empiricko-štatistickom základe (podrobne sú tieto väzby rozobrané napr. v prácach [14 a 36], čiastočne i v [7, 12, 37]).

* Katedra fyzickej geografie, Prírodovedecká fakulta UK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

** Katedra kartografie, geoinformatiky a DPZ PFUK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

Tab. 1. Prvky SVEP. Vlastnosti prvkov (v zátvorke subprocesy a iné vlastnosti, ktoré na ne priamo pôsobia)

Prvky SVEP	VLASTNOSTI PRVKOV (v zátvorke subprocesy a iné vlastnosti, kt. na ne priamo pôsobia)
1. PÔDA	1.1 Charakter povrch. častíc (2.2; 7.3; I.1) 1.2 Pevnosť pôdnych agregátov (1.4; 7.3) 1.3 Infiltračná kapacita (9.1; 7.3; V) 1.4 Vlhkosť (2.1; 2.4; 7.2-3; 8.3; 9.1; IV3.4) 1.5 Textúra v profile (7.3; 9.1; 9.2; I.2)
2. ATMOSFÉRA	2.1 Množstvo zrážok (vstupný prvok 2. nie je v 2.1-2.3 ovplyvňovaný priamo SVEP) 2.2 Trvanie zrážok 2.3 Intenzita zrážok 2.4 Teplota vzduchu (7.2; 8.1; 8.2)
3. VODA PLOŠNÁ	3.1 Hrúbka vod. filmu (1.1; 2.2-3; 7.2; I.2) 3.2 Kinet. energia (1.1; 3.1; 7.1; 8.1; I.5) 3.3 Množstvo splavenín (1.2; I.4; I.5)
4. VODA SÚSTREDENÁ	4.1 Hĺbka toku (8.4; 8.5; III.4; VI.5) 4.2 Kinet. energia (4.1; 4.3; 8.1; I.5) 4.3 Charakter korýt (1.1-2; 1.5; 7.1; III.4) 4.4 Množstvo splavenín (1.2; 2.1-3; I.4-5)
5. VODA PODPOVR- CHOVÁ	5.1 Hydraulický tlak (1.3-5; 9.1; IV.4) 5.2 Koncentrácia roztoku (1.4-5; 5.3; 7.3) 5.3 Infil. rýchľ. (1.1; 1.5; 3.1; 4.1 5.1; I.2)
6. SNEH A ĽAD	6.1 Množstvo (<i>priamo neovplyviteľný vstup</i>) 6.2 Rýchlosť topenia (2.4; 7.2; 8.2) 6.3 Rozdelenie ľadu v profile (2.4; 8.2)
7. KRYT PÔDY	7.1 Drsnostné parametre (<i>ovplyvnené spätnoväzobne eróziou</i>) 7.2 Pokryvnosť a výška 7.3 Pôdno-štruktúrotvorné parametre
8. RELIÉF	8.1 Sklon reliéfu (<i>erózia pôsobí na makrorelief len v dlhodobej časovej škále</i>) 8.2 Orientácia reliéfu 8.3 Formy reliéfu 8.4 Dĺžka svahu 8.5 Veľkosť povodia
9. OKOLIE	9.1 Pripustnosť pôdneho substrátu 9.2 Pevnosť pôdneho substrátu (IV; V; VI.4)

Tab.2. Subprocesy vodnej erózie pôdy (v zátvorke hl. vlastnosti, ktoré na ne priamo pôsobia)

<p>I. Činnosť dažďových kvapiek (7.2;2.1;2.2;2.3)</p> <p>I.1. Rozbíjanie agregátov (1.2;3.1)</p> <p>I.2. Zapečatoňovanie povrchu (1.1;1.5;3.1)</p> <p>I.3. Prenášanie častíc po svahu (1.1;3.1;8.1)</p> <p>I.4. Prenášanie častíc do stružiek (1.1;4.3;)</p> <p>I.5. Zvyšovanie turbulencie toku (3.1;4.1)</p>
<p>II. Plošná erózia (7.1;7.2)</p> <p>II.1. Oddeľovanie častíc (1.2;3.2;8.1)</p> <p>II.2. Prenos častíc (1.1;3.2;3.3)</p> <p>II.3. Ukladanie častíc (1.1;3.2;3.3)</p>
<p>III. Stružková erózia (8.1;8.3;8.4;8.5)</p> <p>III.1. Oddeľovanie častíc (1.2;4.2;4.3)</p> <p>III.2. Prenos častíc (1.1;4.2;4.4)</p> <p>III.3. Ukladanie častíc (1.1;4.2;4.3;4.4)</p> <p>III.4. Formovanie stružky (1.1;1.2;3.2;4.2)</p>
<p>IV. Výmoľová erózia (9.1;9.2;8.4;8.5)</p> <p>IV.1. Oddeľovanie častíc (2.2;4.2;4.3)</p> <p>IV.2. Prenos častíc (1.1;4.2;4.4)</p> <p>IV.3. Ukladanie častíc (1.1;4.2;4.3;4.4)</p> <p>IV.4. Gravitačné procesy na svahoch výmoľa (1.2;1.4;1.5;4.3;5.1)</p> <p>IV.5. Rast výmoľa (1.5;4.2;8.1;8.3)</p>
<p>V. Podpovrchová erózia (1.4;7.3)</p> <p>V.1. Rozpúšťanie (1.1;1.4;5.2)</p> <p>V.2. Prenos látok v roztoku (5.1;5.2;5.3)</p> <p>V.3. Sufózia (1.5;5.1;5.3;9.2)</p>
<p>VI.1 Tvorba povrchového odtoku</p> <p>VI.1. Topenie snehu, ľadu (2.4;6.1;6.2;7.2)</p> <p>VI.2. Padanie zrážok (7.2)</p> <p>VI.3. Výpar (1.4;2.4;7.2;8.1;8.2)</p> <p>VI.4. Infiltrácia (1.1;1.3;1.4;1.5;5.3;1.1)</p> <p>VI.5. Povrchový tok (1.1;7.1;8.1;8.3;8.4;8.5)</p>

Fungovanie systému komplikuje rôzna rýchlosť zmien jednotlivých vlastností prvkov. Tabuľky 1 a 2 sú zamerané na opis SVEP v jeho najkratšej časovej dimenzii, vyššie časové úrovne predstavujú napríklad rytmické zmeny vlastností prvkov (a s nimi zviazaných procesov) počas roka (biorytmus vegetácie, poľnohospodárske práce, chod počasia), striedanie poľnohospodárskych kultúr, viacročné klimatické cykly, až po v geologickej časovej škále sa meniace parametre globálnej klímy a reliéfu. Horizontálne väzby SVEP, určené priestorovými zmenami jednotlivých vlastností, sú v konečnej forme vyjadrené hlavne množstvom pritekajúcej vody a sedimentov do daného bodu a možno ich opísať príslušnými kontinuïtými rovnicami (pozri kap. II.3).

Modelovanie SVEP zahŕňa vytváranie fyzických (látkových) modelov v laboratóriách, ale predovšetkým matematicky formulovaných prognostických modelov, ktoré využívajú poznatky o fungovaní SVEP získané látkovými modelmi, ale aj rôznymi diagnostickými (hlavne stacionárnymi) metódami a zároveň sú týmito metódami spätne verifikované.

Vývoj modelovania SVEP úzko súvisel s vývojom jeho poznania. Hlavné úsilie bolo sústredené na poznanie a modelovanie správania sa SVEP v inžinierskej časovej škále, v človekom využívaných oblastiach, kde erózy proces vedie k urýchlenej degradácii pôdy. Vývoj pritom smeroval k poznaniu a modelovaniu SVEP v stále väčšej mierke, čo umožnilo využívať erózne modely v procese optimalizácie využitia poľnohospodárskej pôdy. SVEP bol spočiatku skúmaný hlavne metódou čiernej skrinky, čomu zodpovedali prvé jednoduché modely opisujúce štatistický vzťah medzi výsledkom procesu (odnosom) a predpokladanou kľúčovou vlastnosťou SVEP. Rozšírenie metódy čiernej skrinky na multifaktorovú štatistickú analýzu odnosu a viacerých vlastností SVEP viedlo k vývoju prvej generácie široko použiteľných prognostických modelov. Ich najvýznamnejším predstaviteľom je model USLE (*Universal Soil Loss Equation*) vyvinutý v USA v 60. rokoch [41]. Už vtedy však došlo k nástupu analytických (fyzikálno-matematických) metód vo výskume SVEP, čo viedlo ku vzniku čoraz viacerých najskôr len parciálnych, neskôr i komplexných komponentných modelov budovaných na poznaní jednotlivých subprocessov erózneho procesu. Najskôr prevládali konceptuálne modely založené na báze kontinuïtých rovníc analogickej jednotkovému hydrogramu, ktoré umožňovali postihnúť hlavne časovú diferenciaciu odnosu známeho množstva sedimentov. Súbežne sa budovali modely na fyzikálno-procesnej báze, ktorých vývoj vyústil do vzniku novej generácie v súčasnosti budovaných modelov akceptujúcich hlbšiu systémovú podstatu SVEP (bližšie pozri napr. [18, 11]).

II MODELOVANIE PROCESOV VODNEJ ERÓZIE PÔDY V SÚČASNOSTI

Modelovanie SVEP sa dnes rozvíja vo všetkých v úvode načrtnutých smeroch, centrálné postavenie však zaujíma čoraz viac nová generácia komplexných prognostických modelov. Empiricko-štatistické modely typu USLE majú síce dodnes dominantné postavenie v aplikačnej oblasti, zenit svojho vývoja však už zrejme prekročili. Parciálne modely majú dnes viacero funkcií a budú sa vyvíjať zrejme i v budúcnosti so zameraním na hlbšie vedecké poznávanie štruktúry SVEP.

II.1 Parciálne modelovanie SVEP a metódy verifikácie modelov

Súčasný parciálne modely sa snažia odraziť doteraz dostatočne nepoznanú štruktúru subprocesov či jednotlivých väzieb SVEP. V tejto oblasti možno nájsť modely utvorené na analyticko-fyzikálnej báze (napr. modelovanie oddeľovania častíc pôdy v teoretickej rovine [38]); modely prevažne konceptuálneho charakteru (napr. model vplyvu topografie na sedimentáciu a eróziu [23] model lokalizácie pravdepodobnej tvorby efemérnych výmoľov na báze morfometrických údajov [25]); empiricko-štatistické modely (laboratórne modelovanie vplyvu zamŕznania a rozmŕznania pôdy na jej odnos [5] či redukcie odtoku a erózie vplyvom fosfogypsu, ktorý bráni prechodu pôdnych častíc do stavu sôl počas búrky [1]).

Oblasť verifikácie modelov reprezentuje hlavne laboratórne (látkové) modelovanie (napr. testovanie a kalibrácia modelu plošnej erózie [21]), ale čiastočne aj diagnosticky zamerané stacionárne a terénne výskumy [20, 8], a tiež určenie pravdepodobného oboru platnosti modelu USLE pre jednotlivé hodnoty jeho faktorov [6]. Príkladom spojenia oboch oblastí môže byť laboratórne modelovanie erózneho účinku kvapiek spojené s analytickým odvodením patričných vzťahov a kalibráciou príslušnej laboratórnej techniky [33, 39].

II.2 Rozvoj komplexných modelov prvej generácie

Väčšina v súčasnosti používaných a vyvíjaných modelov tohto typu predstavuje viacerých modifikovaný model USLE (*Universal Soil Loss Equation*) [41] vyjadrený rovnicou

$$A = R.K.L.S.C.P, \quad (1)$$

kde A - odnos pôdy, R - faktor erózneho účinnosti dažďa, K - faktor pôdnej erodovateľnosti, LS - faktory dĺžky a sklonu svahu, C - faktor pokryvu pôdy (vegetácie) a P - faktor protierozných opatrení (bližšie v [41, 32]).

Porovnanie tohto vzťahu s v úvode načrtnutou štruktúrou SVEP ukazuje jeho zásadné nedostatky. Vznikajúce modifikácie USLE sa snažia o rozšírenie jeho platnosti a presnosti, nemôžu však prekročiť jeho empiricko-štatistickú podstatu.

V tomto smere najprogressívnejšou modifikáciou USLE snažiacou sa využiť nové poznatky o SVEP je RUSLE (*Revised USLE*) [34, 35]. Faktor R je tu modifikovaný v rovinných oblastiach a zohľadňuje aj spoločné pôsobenie dažďa a topiaceho sa snehu. Vo faktore K je vyjadrená jeho ročná premenlivosť a doplnené okrajové hodnoty. Faktor L je vyjadrený nielen ako funkcia sklonu, ale i citlivosti pôdy na stružkovú a medzistružkovú eróziu (je funkciou vlastností pôdy a sklonu). Pre zmeny sklonu pozdĺž spádovej krivky (komplexný svah) je S faktor upravený pomocou segmentácie svahu na relatívne homogénne úseky, ktoré svojou váhou prispievajú k celkovej hodnote LS faktora v danom bode [22]. C faktor je rozdelený na štyri subfaktory, ktoré charakterizujú predošlé využitie pôdy, pokryvnosť, drsnosť pokryvu a jeho vnútropôdny efekt. RUSLE takto zohľadňuje množstvo nových faktorov ovplyvňujúcich SVEP, avšak s metodologickou stavbou dedí po USLE

všetky z toho plynúce nedostatky (pozri kap. II.3.). Navyše ani revidovaný faktor dĺžky svahu L nevyjadruje dostatočne vplyv reliéfu na erózne procesy, najmä pri konvergujúcich a divergujúcich svahoch.

Neschopnosť USLE postihnúť diferenciáciu odnosu materiálu zo zložených svahov sa snaží riešiť viacero autorov v prácach založených už na analyticko-procesnej báze, avšak len vo vzťahu k topografickému faktoru. Na základe teórie jednotkovej sily toku Moore a Burch [24] ukázali fyzikálnu podstatu LS faktora, pričom namiesto dĺžky svahu použili v ňom prispievajúcu plochu na jednotkový úsek vrstevnice, ktorá vyjadruje konvergenciu a divergenciu svahov:

$$L.S = (As/22.13).(\sin b/0.0896), \quad (2)$$

kde As - špecifická prispievajúca plocha, b - sklon. Pre transportačne limitovaný prípad erózie je v práci [23] uvedené aj zovšeobecnenie teórie jednotkovej sily toku pre plošnú a stružkovú eróziu. Odvodený erózo-akumulačný model okrem bežných morfometrických parametrov (sklonu a dĺžky svahu) využíva d grad/dn vyjadrujúcu dynamiku pohybu materiálu a analógiu horizontálnej krivosti, topicky vyjadrujúcu konvergenciu a divergenciu toku materiálu na svahu.

V modeli $dUSLE$ (*differential USLE*) [9] je výsledný vzťah pre LS faktor kombináciou rovnice zohľadňujúcej váhu jednotlivých častí svahu z práce [3] a rovnice (2). Významnou prednosťou $dUSLE$ je i jeho napojenie na digitálny model terénu (DMT) a geoinformačný systém (GIS), problém sa však zasa rieši len parciálne - vzhľadom na topografický faktor.

II.3 Nová generácia komplexných erózných modelov

Štatisticko-empirická povaha modelov prvej generácie nezohľadňuje dostatočne zložitú vnútornú štruktúru SVEP. V USLE používané faktory nevyjadrujú všetky podstatné vlastnosti SVEP, rovnica (1) neodráža zložité vnútorné a zväčša nelineárne vzťahy medzi faktormi, štatistický prístup obmedzuje regionálne i metodicky jej platnosť (platnosť sa viaže predovšetkým na oblasti, v ktorých boli robené vstupné merania, z výpočtu a priori vylučuje oblasti s akumuláciou materiálu) a sťažuje možnosti jej inovácie. S rastom poznania SVEP sa preto štruktúra USLE stáva čoraz menej vyhovujúcou. Zásadnú zmenu nemohli priniesť ani jej modifikácie.

Ako odozva na uvedené nedostatky USLE a vývoj v oblasti GIS sa v roku 1985 začal realizovať veľký aplikačný projekt erózneho modelu novej generácie - WEPP (*The Water Erosion Prediction Project*) [10, 16, 17, 19, 29, 30], ktorý je postavený na rešpektovaní vnútornej štruktúry SVEP, čím efektívnejšie zhodnocuje vstupnú informáciu (často analógickú vstupom do RUSLE) a rozširuje sa obor platnosti modelu. Na tomto projekte spolupracujú viaceré poľnohospodárske, pôdoznancké, lesnícke inštitúcie a viaceré univerzity v USA a niekoľko zahraničných organizácií. Jeho široké použitie sa predpokladá až po roku 1995.

WEPP sa vyvíja v troch verziách, a to ako: profilový, bazénový a gridový (rastrový) WEPP. Profilový WEPP priamo nahradí USLE v prognózovaní odneseného materiálu zo svahu ako celku s dodatočnou schopnosťou určovať množstvo uloženého materiálu. Bazé-

nová verzia obsahuje profilovú verziu a bude aplikovaná v malých povodiach, kde profilová verzia vypočíta odnos materiálu zo svahov do toku, v ktorom bude navyše počítaná bilancia materiálu. Gridová verzia rozdelí plochu, kde hranice nie sú zhodné s hranicami povodia na elementy, v ktorých bude na výpočet erózie použitá profilová verzia, pričom sa zohľadní prenos materiálu medzi elementami. WEPP je simulačný model, ktorý bude schopný každý deň počítať množstvo odneseného, transportovaného a uloženého materiálu na základe údajov o vegetácii, pôde a zrážkach. WEPP bude implementovaný na osobných počítačoch (PC) s mikroprocesorom 80386 spolu s matematickým koprocesorom pracujúcich pod operačným systémom UNIX [16].

Podstatou modelu WEPP, ktorou sa zásadne odlišuje od modelov typu USLE, je kvantifikácia jednotlivých subprocesov SVEP (pozri kap. I.). Model vychádza z kontinuitnej rovnice zachovania hmoty v tvare [30]:

$$dG/dx = D_r + D_i, \quad (3)$$

kde x - vzdialenosť po spádnicí (m), G - množstvo sedimentov (kg/s/m), D_i - rýchlosť medzistružkovej erózie (kg/s/m^2), D_r - rýchlosť stružkovej erózie (kg/s/m^2).

WEPP využíva koncepciu vzťahu stružkovej a medzistružkovej erózie, kde medzistružková erózia je súborom plošnej erózie a erózneho pôsobenia dažďa. Stružková erózia vzniká vtedy, keď hydraulický strižný tlak prekročí kritický strižný tlak a keď množstvo sedimentov vo vode je menšie ako transportačná kapacita toku. Platí

$$D_r = D_c(1 - G/T_c), \quad (4)$$

kde D_c - oddeľovacia kapacita toku (kg/s/m^2), T_c - transportačná kapacita toku v stružke (kg/s/m).

V prípade, že hydraulická strižná sila pre danú pôdu prekračuje kritickú hodnotu, oddeľovaciu kapacitu toku D_c môžeme vyjadriť vzťahom

$$D_c = K_r(\sigma_r - \sigma_c), \quad (5)$$

kde K_r (s/m) - parameter pôdnej erodovateľnosti v stružke, σ_r (Pa) - strižná sila toku pôsobiaca na pôdu, σ_c (Pa) - kritická hodnota strižnej pevnosti pôdy. D_c sa považuje za nulové, ak σ_r je menšie ako σ_c .

Transportačná kapacita T_c je počítaná použitím zjednodušenej transportačnej rovnice v tvare

$$T_c = k_t \sigma_r^{3/2}, \quad (6)$$

kde k_t je empiricky zistený transportačný koeficient.

Pre ukladanie platí rovnica

$$D_i = (V_f/q)(T_c - G), \quad (7)$$

kde q - prietok cez jednotkovú šírku (m^2/s), V_f - sedimentačná rýchlosť (m/s).

$$q=ah^{3/2}, \quad (8)$$

kde h - je hĺbka prúdu (m), a - koeficient závislý od drsnosti podložia, jeho sklonu a viskozity suspenzie vyjadrený $m^{1/2}s^{-1}$.

Medzistružková erózia je vyjadrená v tvare [27], a to:

$$D_1=K_i \cdot I_e^2 \cdot C_e \cdot G_e \cdot S_f, \quad (9)$$

kde K_i - medzistružková erodovateľnosť pôdy ($kg s^{-1} m^{-2}$), I_e - efektívna intenzita zrážok (ms^{-1}), C_e - vplyv nadpovrchového (vegetačného) krytu na eróziu, G_e - vplyv povrchového krytu na eróziu, S_f - regulačný faktor sklonu - s; $S_f=1,05-0,85e^{-4 \cdot \sin^5}$. Parameter K_i môžeme vyjadriť v tomto základnom tvare:

$$K_i=(-2,92-2,71(C_{1wd}/C_1)-0,51M_g+10,0C_{1wd}+4,19(C_1/(F_e+A_1)_{0,16}+1,24C_d)10^6, \quad (10)$$

kde C_{1wd} - frakcia vo vode disperzovateľného flu v pôde (%), C_1 - obsah flu v pôde (%), M_g - obsah magnézia v pôde ($cmol kg^{-1}$), F_e a A_1 - obsah železa a hliníka v pôde (%), C_d - elektrická vodivosť pôdy ($mmhos cm^{-1}$).

Parameter C_e môžeme vyjadriť

$$C_e=1-F_e e^{-0,34H_c}, \quad (11)$$

kde F_e - pomerná časť pôdy chránená vegetačným krytom, H_c - efektívna výška vegetácie (m).

Rovnica pre vplyv prízemnej vegetácie je v tvare

$$G_e=e^{-2,5g_i}, \quad (12)$$

kde g_i je pomerná časť medzistružkového povrchu chránená prízemnou vegetáciou.

Od týchto vzťahov sa odvíja kvantifikácia ďalších väzieb v SVEP podrobnejšie rozvedená v prácach [19, 30].

Vstupnými parametrami pre WEPP sú meteorologické ukazovatele, ako sú celkový zrážkový úhrn privalového dažďa a jeho trvanie, pomer maximálnej intenzity zrážky a priemernej intenzity zrážky, čas výskytu maximálnej intenzity, denná maximálna a minimálna teplota a slnečná radiácia. Tieto vstupy sa využívajú pri výpočte trvania, maximálnej rýchlosti a celkového množstva odtoku metódou jednotkového hydrogramu, pričom sa berie do úvahy aj topenie snehu, množstvo živej biomasy nad a pod povrchom, rozklad biomasy a obsah pôdnej vody v rôznych pôdnych horizontoch.

Zamrznutie pôdy, topenie snehu a akumulácia snehu môže významne ovplyvniť proces erózie. Pre príslušné meteorologické situácie sa preto denne počíta napr. hĺbka zamrzutej pôdy, hĺbka rozmrzutej vrstvy, infiltračná kapacita, vodná bilancia v zamrzutej pôde a topenie snehu. Súčasťou modelu je generátor meteorologických situácií umožňujúci dlhodobú prognózu erózie pôdy.

Vegetačná pokrývka má hlavný vplyv na energiu dopadajúceho dažďa a na množstvo vody v pôde, ako aj ďalšie pôdne vlastnosti, ktoré priamo či sprostredkovane ovplyvňujú

množstvo povrchového odtoku. Významnou zložkou WEPP je preto simulácia rastu a rozkladu nadzemnej i podpovrchovej časti rastlín založená na vstupných klimatických, pôdnych a agrotechnických ukazovateľoch.

Z pôdnych vlastností je dôležitá erodovateľnosť z hľadiska stružkovej a medzistružkovej erózie, drsnosť povrchu, nasýtená hydraulická vodivosť a kritická hodnota hydraulického tlaku. Tieto parametre sú zisťované experimentálne pre jednotlivé pôdne typy a druhy. Významné miesto medzi vstupnými údajmi má spôsob obrábania ornej pôdy, používaná agrotechnika a jednotlivé agrotechnické termíny.

Všeobecne môžeme konštatovať, že WEPP predstavuje definitívny odklon od faktorového odhadu vodnej erózie (USLE) k výpočtu erózie na základe poznania prebiehajúcich subprocesov a ich matematického vyjadrenia. Keďže samotný model je vo forme programu implementovaný na počítači, je len samozrejmé, že sa počíta s čerpaním značnej časti vstupných údajov z údajov bázy GIS.

Napriek nesporným koncepčným prednostiam a snahe o komplexné poňatie možno aj v projekte WEPP nájsť niektoré nedostatky. Podľa práce [11] sú to nedostatočne fyzikálne objasnené procesy transportu a sedimentácie; vplyv základných vlastností pôdy na jej erodovateľnosť a infiltráciu pri modifikujúcom vplyve klímy, orby a agropostupov; nevhodná definícia a model štruktúry siete stružiek. Empirický charakter má však i napr. vzťah pre medzistružkovú eróziu (6), model tiež nezohľadňuje podpovrchový odnos materiálu ani výmohovú eróziu a eróziu stálych tokov.

Existuje a vyvíja sa viacero ďalších často širšie koncipovaných, alebo čiastočne inak zameraných modelov novej generácie (hlavne na výpočet distribúcie poľnohospodárskeho znečistenia pôdy), ktoré obsahujú aj príslušný erózný model.

ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation*) bol vyvinutý na simulovanie správania povodí s poľnohospodárskym využitím. ANSWERS umožňuje určovať vplyvy poľnohospodárskych činností na kvalitu vody, ktorá opúšťa povodie. Jeho hlavnou úlohou je kontrola erózie a sedimentácie v povodiach, analýza kvality vody vo vzťahu k chemickým látkam v sedimentoch. Využíva gridový prístup, preto môže využívať dáta a analýzy z GIS, prípadne údaje DPZ (napr. obrazové záznamy SPOT, LANDSAT) [2, 4]. Je to plne dynamický model pre jednotlivý výskyt dažďa.

AGNPS (*Agricultural Nonpoint Source Pollution Model*) bol vyvinutý pre podobné účely ako ANSWERS. Jeho štruktúra tvorí základ gridovej verzie WEPP [40, 31], je však založený na starších hydrologických modeloch.

Oba modely (ANSWERS a AGNPS) bývajú napĺňané ručne pre každý štvorcový element, čo značne zvyšuje finančné a časové náklady. Oba majú tiež limitovanú schopnosť počítať eróziu koncentrovaných tokov.

CREAMS (*A Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) je zameraný na priestorovú analýzu kvality vody. Jeho algoritmus je detailnejší ako pri WEPP, ale aj menej pružný, obmedzený len na homogénny rastlinný porast, má len profilovú a bazénovú verziu.

EPIC (*Erosion/Produktivita Impact Calculator*) modeluje pokles úrody ako dôsledok erózie pôdy. Určuje preto predovšetkým vplyv erózie na zmenu vlastností pôdy, vyžaduje podrobnejšie vstupné informácie ako WEPP, ale v ňom obsiahnutý erózný model je zjednodušený.

SPUR (vyhodnocuje dopad rôznych spôsobov využitia trvalých trávnych porastov na ich produkčnosť. Má silne rozpracovaný biokomponent (uvažuje interakciu rôznych rastlinných druhov i pôsobenie živočíchov), vlastný erózný model však zaostáva za WEPP.

III ZÁVER

Z analýzy vyplýva, že v súčasnosti vývoj v oblasti modelovania SVEP jednoznačne smeruje k matematickému vyjadreniu subprocesov tvoriacich vodnú eróziu a k implementácii takéhoto modelu vo forme programu do počítača.

Z hľadiska získavania vstupných údajov sa stávajú rozhodujúcim zdrojom geoinformačné systémy (GIS) [28]. V oblasti získavania údajov o reliéfe (sklon, orientácia voči svetovým stranám, dĺžky svahov, krivosti a prispievajúce plochy) sú značné možnosti využitia digitálnych modelov terénu (DMT), najmä čo do rýchlosti a presnosti výpočtu [13, 15, 31, 26]. V tejto súvislosti možno pripomenúť, že vo väčšine modelov sa často stáva kritickým článkom vyjadrenie vplyvu reliéfu na procesy erózie. Pritom analýza reliéfu nám môže často poskytnúť prvotnú informáciu o náchylnosti daného územia k erózii. Zdrojom ďalších informácií týkajúcich sa hlavne využitia zeme a sezónne premenlivých vlastností pôdy sa zrejme stane DPZ. Vzhľadom na špecifickosť niektorých údajov bude potrebné ich získavanie v podrobnom terénnom výskume, stacionárnom výskume, prípadne laboratórnymi metódami. Z hľadiska časovej dynamiky niektorých parametrov vstupujúcich do WEPP (klimatických a hydrologických) vzniká potreba ich neustáleho monitoringu.

Napojenie erózných modelov na GIS umožní zároveň ich zabudovanie do rozsiahlejších optimalizačných modelov (metodík), hlavne vo vzťahu k priestorovej optimalizácii krajiny štruktúry. Efektívnosť týchto modelov môže zvýšiť aj ich prepojenie (v rámci GIS) s modelmi ďalších geomorfologických procesov, ktoré sú s vodnou eróziou pôdy v interakcii (veterná erózia, creep a pod.). Prepojenie zabezpečí nielen presnejší výpočet globálnej straty pôdy, ale môže sa stať aj bázou exaktného modelovania dlhodobého vývoja geomorfologických systémov.

Pri hodnotení WEPP možno konštatovať, že tento model nepochybne nahradí koncom tohto desaťročia doteraz používaný model USLE nielen v USA, ale aj inde vo svete. Väčšinu z jeho vyššie načrtnutých nedostatkov možno postupne odstraňovať, model má perspektívu ďalšieho progresívneho vývoja. Značným obmedzením použitia erózných modelov novej generácie u nás môže byť finančná náročnosť pri získavaní niektorých vstupných údajov a doterajšia neexistencia fungujúceho GIS s podrobnými údajmi o území Slovenska, ktoré by boli z tohto hľadiska efektívne využiteľné. Z hľadiska dlhodobej perspektívy je však i u nás potrebné usilovať sa o utváranie podmienok na implementáciu týchto modelov do metodík zaoberajúcich sa hodnotením a optimalizáciou krajinných štruktúr.

1. AGASSI, M., SHAINBERG, I., MORIN, J.: Slope, Aspect and Phosphogypsum Effects on Runoff and Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 54, 1990, pp. 1-8. - 2. ARNOLD, J.G., ZHUANG, X., ENGEL, B.A., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R., REWERTZ, CH.: Intelligent GIS for Natural Resource Modelling and Site Selection. (Manuscript) 1991, 12 pp. - 3. AUSWALD, K., FLACKE, W., NEUFANG, L.: Räumlich differenzierende Berechnung grossmasstäblicher Erosionsprognosekarten - Modellgrundlagen der dABAG. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 151, 1988, pp. 369-373. - 4. De ROO, A.P.J., HAZELHOFF, L., BURROUGH, P.A.: Soil erosion modelling using „ANSWERS“ and Geographical information systems. *Earth Surface Processes and Landforms* 14, 1989, pp. 517-532. - 5. EDWARDS, L.M., BURNEY, J.R.: The effect of antecedent freeze-thaw frequency on runoff and soil loss from frozen soil with and without subsoil compaction and ground cover. *Can. J. Soil Sci.* 69, 1989, pp. 799-811. - 6. EDWARDS, L.M.: Analyzing Uncertainty in Predicted Event Erosion from Small Rangeland Watersheds. *Transactions of the ASAE*, Vol. 33, No. 4, 1990, pp. 1141-1146. - 7. EMBLETON, C., THORNES, J.: Process in geomorphology. (poř. preklad), 1985, 479 pp. - 8. EVANS, R.: Water erosion in British farmers' fields - some causes, impacts, predictions. *Progress in Physical Geography*, Vol. 14, 1990, pp. 199-219. - 9. FLACKE, W., ANERSWALD, K., NEUFANG, L.: Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a Digital Terrain Model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17, 1990, pp. 383-397. - 10. FOSTER, G.R.: Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In: Boardman, J., Foster, I.D.L., Dearing, J.A.: *Soil erosion on agricultural land*. 1990.
11. FOSTER, G.R.: Advance in Wind and Water Erosion Prediction. *J. of Soil and Water Conservation*, 46, 1991, pp. 27-29. - 12. GERITS, J.J.P., de LIMA, J.L.M.P., van den BROEK, T.M.N.: Overland flow and erosion. In: *Process Studies in Hillslope Hydrology* (ed. M.G. Anderson, T.P. Burt) 1990, pp. 173-214. - 13. HOFIERKA, J.: Modelovanie vodnej erózie a vývoja svahov. *Práca ŠVOČ, PrF UK Bratislava*, 1991, 31 pp. - 14. KIRKBY, M.J., MORGAN, R.P.C. ed.: *Soil Erosion*. (Ruský preklad) 1984, 414 pp. - 15. KRCHO, J.: Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu. *VEDA Bratislava*, 1990, 432 pp. - 16. LAFLEN, J.H., LANE, I.L.J., FOSTER, G.R.: WEPP-A new generation of erosion prediction technology. *J. of Soil and Water Conservation*, 46, 1991, pp. 34-38. - 17. LAFLEN, J.M., ELLIOT, W.J., SIMANTON, J.R., HOLZHEY, C.S., KOHL, K.D.: WEPP - Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. *J. of Soil and Water Conservation*, 46, 1991, pp. 39-44. - 18. LANE, L.J., SHIRLEY, E.D., SINGH, V.P.: Modelling erosion on hillslopes. In: Anderson, M.G.: *Modelling geomorphological systems*. 1988. - 19. LANE, L.J., NEARING, M.A. (eds): *USDA - Water Erosion Predictions Project: Hillslope Profile Model Documentacion*. NSERL Report No. 2, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, 1989. - 20. MARTZ, L.W., de YOUNG, E.: Using Cesium-137 to assess the variability of net soil erosion and its association with topography in a Canadian prairie landscape. *Catena*, 14, 1987, pp. 439-451.
21. MATHIER, L., ROY, A.G., PARÉ, J.P.: The effect of slope gradient and length on the parameters of a sediment transport equation for sheetwash. *Catena*, 16, 1989, pp. 545-558. - 22. MCCOOL, D.K., FOSTER, G.R., MUTCHLER, C.K., MEYER, L.D.: Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32, 1989, pp. 1571-1576. - 23. MOORE, I.D., BURCH, G.J.: Modelling erosion and deposition: topographic effects. *Trans. of the ASAE*, 29, 1986, pp. 1624-1630. - 24. MOORE, I.D., BURCH, G.J.: Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1986, pp. 1294-1298. - 25. MOORE, I.D., BURCH, G.J., MACKENZIE, D.H.: Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Trans. of the ASAE*, 31, 1988, pp. 1098-1107. - 26. MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A.R.: Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 1991. - 27. MOORE, I.D., NIEBER, J.L.: Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution. *Journal of Minnesota Acad. of Sc.*, Vol. 55, No. 1, 1989, pp. 18-24. - 28. MOORE, I.D., WILSON, J.P., CIESOLKA, C.A.: Soil Erosion Prediction and GIS: Linking Theory and Practice. *Manuscript*, 1992. - 29. NEARING, M.A., DEER-ASCOUGH, L., LAFLEN, J.M.: Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Trans. of the ASAE*, 33, 1990, pp. 839-849. - 30. NEARING,

M.A., FOSTER, G.R., LANE, L.J., FINTNER, S.C.: A process-based soil erosion model for USDA - Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. of the ASAE*, 32, 1989, pp. 1587-1593.

31. PANUSKA, J.C., MOORE, I.D., KRAMER, L.A.: Terrain Analysis: Integration into the agricultural nonpoint source (AGNPS) pollution model. *J. of Soil and Water Conservation*, 46, 1991, pp. 59-64. - 32. PASÁK, V. a kol.: Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe, 11, ÚVTIZ Praha, 1983, 77 pp. - 33. POESEN, J, TORRI, D.: The effect of cup size on splash detachment and transport measurements Part I: Field measurements. *Catena supplement*, 12, 1988, pp. 113-126. - 34. Predicting Soil Erosion by Water - A Guide To Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USD of Agriculture, ARS, Draft 9/1991. - 35. RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., PORTER, J.P.: RUSLE - Revised universal soil loss equation. *J. of Soil and Water Conservation*, 46, 1991, pp. 30-33. - 36. RICHARDS, K.S., ARNETT, R.R., ELLIS, S. ed.: *Geomorphology and Soils*. London-Boston-Sydney 1985. - 37. ROSE, C.W.: Research progress on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices. In: Lal, R.: *Soil erosion research methods*. 1988, pp. 119-139. - 38. TORRI, D.: A Theoretical Study of Soil Detachability. *Catena supplement*, 10, 1987, pp. 15-20. - 39. TORRI, D., POESEN, J.: The Effect of Cup Size on Splash Detachment and Transport Measurements Part II: Theoretical Approach. *Catena supplement*, 12, 1988, pp. 127-137. - 40. YOUNG, R.A., ONSTAD, CH.A., BOSCH, D.D., ANDERSON, E.P.: AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model: A watershed analysis tool. 1987. US Department of Agriculture, Conservation Research Report, 35, 80 pp.

41. WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D.: Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning *Agriculture Handbook No. 537*, US Department of Agriculture, Washington D.C., 1978, 58 pp.

Jozef M i n á r, Jaroslav H o f i e r k a

SLOPE MODELS OF SOIL WATER EROSION: PRESENT SITUATION AND THE OUTLOOKS

The contribution brings a picture and critical evaluation of the contemporary situation in modelling of soil water erosion from the point of view of system approach. Introduction contains definition of the system of water soil erosion SVEP (by means of its elements, subsystems and inner structure), outlined situation of knowledge and development of the learning and modelling, that tended from the models of black box type to a process (system) based model in the frame of partial as well as complex models. Survey of the contemporary situation of modelling of SVEP is aimed in the first part to a brief description and evaluation of complex models of first generation based on statistical-empirical approach (mainly the USLE model [41] and its most progressive alternative RUSLE [34, 35]). The principal drawback of these models is the limited methodology and application as a consequence of lack of consideration for the inner structure of SVEP. Focus of the work is in the description and evaluation of the onsetting complex models of new generation based on a process approach represented especially by WEPP model [19, 30]. These models are, thanks to the methodological base, respecting the contemporary knowledge of the structure of SVEP, able to utilize very effectively the input information and to simulate a daily soil erosion and deposition of material in the space. A remarkable advantage of WEPP is the possibility of its application in many resorts, its deficiency are some restrictions (it does not take in account, for instance, the gorge erosion, subsurface erosion of material or convergence and divergence of the topographic area). The brief survey offers an evaluation of additional models of new generation (mostly broadly conceived) containing also the corresponding model of erosion. Conclusion evaluates the contemporary trend in SVEP modelling and the possibilities of its realization in Slovakia.

Table 1. SVEP elements. Properties of elements (in brackets subprocesses and other characteristics, that directly affect them).

Table 2. Subprocesses of water erosion (in brackets main characteristics, that directly affect them).

Translated by H. C o n t r e r a s o v á