

MODELOWANIE EROZJI WODNEJ W KLIMACIE MONSUNOWYM
O NAJWYŻSZYCH NA ŚWIECIE OPADACH
(ZLEWNIA UMIEW, WYŻYNA MEGHALAYA, INDIE)

Paweł Prokop

Zakład Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn,
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
ul. św. Jana 22, 31-018 Kraków
e-mail: pawel@zg.pan.krakow.pl

Streszczenie. Erozja wodna jest głównym czynnikiem degradacji gleb na Wyżynie Meghalaya. Badania prowadzono w zlewni Umiew o powierzchni 500 km², obszarze o najwyższych na świecie opadach sięgających średnio 12000 mm rocznie. Do oceny wielkości erozji zastosowano empiryczny model erozji RMMF (Revised Morgan-Morgan-Finney). Analizy przestrzenne wykonano w systemie GIS. Prognozowane przez model średnie roczne wartości erozji są umiarkowanie wysokie i zawierają się w przedziale 0-145 Mg·ha⁻¹·rok⁻¹. Dna dolin są dobrze zabezpieczone przed erozją – poniżej 1 Mg·ha⁻¹·rok⁻¹. Wysokie wartości erozji na polach roślin okopowych do 145 Mg·ha⁻¹·rok⁻¹ (średnio 60 Mg·ha⁻¹·rok⁻¹) wynikają z intensywnej gospodarki rolnej na krótkich ale stromych stokach o nachyleniach sięgających 40°. Wielkość erozji 5 Mg·ha⁻¹·rok⁻¹ można szacunkowo przyjąć za górną granicę naturalnej składowej erozji w gęstym lesie subtropikalnym w strefie ekstremalnych opadów.

Słowa kluczowe: erozja gleb, modele erozyjne, Indie

WYKAZ OZNACZEŃ

R – średni opad wieloletni (mm),

A – intercepcja opadu przez roślinność wyrażona jako proporcja między 0 a 1,

CC – procentowe pokrycie sklepienia roślin wyrażone jako proporcja między 0 a 1,

I – energia kinetyczna opadu (J·m⁻²),

PH – wysokość sklepienia roślin (m),

K – wskaźnik podatności gleby na erozję (g·J⁻¹),

R_o – średni opad w dniu z opadem (mm),

MS – połowa pojemność wodna (% wagowe),

BD – gęstość objętościowa ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$),
EHD – efektywna hydrologicznie warstwa gleby kontrolująca spływ powierzchniowy (m),
 E_r/E_o – stosunek ewapotranspiracji aktualnej do potencjalnej,
 S – nachylenie stoków ($^\circ$),
GC – procentowe pokrycie gleby wyrażone jako proporcja między 0 a 1,
COH – kohezja gleby (kPa),
 C – wskaźnik okrywy roślinnej C z uniwersalnego równania strat gleby (USLE).

WSTĘP

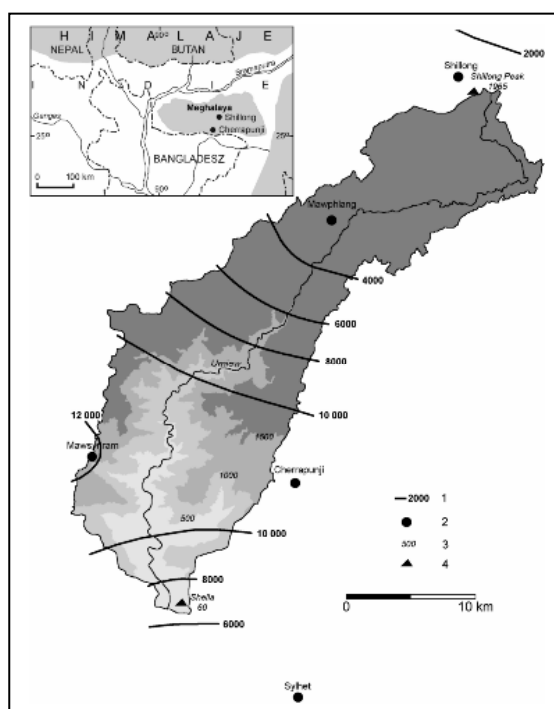
Degradacja gleb, a zwłaszcza przyspieszona erozja wodna na Wyżynie Meghalaya jest wynikiem współdziaływania czynników naturalnych: najwyższych na świecie opadów, trzęsień ziemi i procesów grawitacyjnych na stromych stokach oraz czynników antropogenicznych: wylesiania na potrzeby rolnictwa i przemysłu w warunkach wzrastającej presji ludnościowej [16].

Badania prowadzono w zlewni Umiew o powierzchni 500 km^2 odwadniającej południowy skłon Wyżyny Meghalaya (rys. 1). Zlewnia obejmuje fragment pagórkowatego plateau w którym, wskutek intensywnych procesów denudacji, wycięty jest głęboki kanion. Obszar znajduje się w zasięgu oddziaływania klimatu monsunowego z wysokimi opadami latem i suchą zimą. Stacje Mawsynram i Cherrapunji notują najwyższe na świecie opady roczne średnio 11000-12000 mm. Wraz z oddalaniem się od krawędzi wyżyny wielkość opadu szybko maleje osiągając w Shillongu jedynie 2200 mm. Średnie roczne temperatury zmieniają się od 25°C u ujścia Umiew do 14°C na wysokości prawie 2000 m n.p.m.

Połowę powierzchni zlewni zajmują subtropikalne, wiecznie zielone lasy o różnym stopniu degradacji, porastające strome stoki kanionów do wysokości 1600 m n.p.m. Płaty lasów sosnowych (powyżej 1600 m n.p.m.) i trawy rosnące na płaskim plateau (powyżej 1200 m n.p.m.) stanowią roślinność wtórną rozwiniętą na obszarze silnej antropopresji. Jedynie 5% powierzchni zlewni zajęte jest pod uprawę ryżu w dnach dolin oraz ziemniaków, uprawianych na stokach w północnej części zlewni między Shillongiem i Mawphlangiem.

Gleby badanego obszaru obejmują trzy grupy: ultisole (czerwonożółte zbielicowane i czerwono-brunatne laterytowe), alfisole (szarobrunatne zbielicowane) i inceptisole (brunatne kwaśne) [1]. Północna część zlewni, położona w strefie kwarcytów i granitów, pokryta jest starymi pokrywami zwietrzelinowymi z dobrze wykształconymi profilami glebowymi o miąższości do 2 m. Gleby okolic Cherrapunji i Mawsynramu rozwinięte na młodszym kompleksie skał osadowych – piaskowcach i wapieniach, są płytsze (o miąższości 25-50 cm), często szkieletowe, porośnięte trawami, z głazami na powierzchni wskazującymi na dużą skalę erozji w przeszłości [13]. Pod względem cech teksturalnych dominują frakcje gruboziarniste:

piaski, piaski gliniaste, gliny piaszczyste; rzadziej gliny i pyły piaszczyste w dnach niewielkich, płaskodennych dolin. Wszystkie gleby są kwaśne o pH 3,3-5,9. Zawartość materii organicznej waha się od 0,8% na terenach zdegradowanych do 8,5% w lasach. Gospodarka żarowo-odłogowa, wypas i eksploatacja minerałów przyczyniły się w wielu miejscach do usunięcia profilu glebowego aż do cokołu skalnego.



Rys. 1. Położenie Wyżyny Meghalaya i zlewni Umiew. 1 – izohiety ze średnimi wartościami opadu (mm) z okresu 1999-2000, 2 – stacje opadowe, 3 – poziomic, 4 – wysokości (m n.p.m.)
Fig. 1. Location of Meghalaya Hills and Umiew catchment. 1 – isohyets with average rainfall (mm) for the period 1999-2000, 2 – rainfall stations, 3 – contours, 4 – elevations (m a.s.l.)

MATERIAŁ I METODY

Do oceny erozji wodnej zastosowano empiryczny model RMMF (Revised Morgan-Morgan-Finney) [11], prognozujący wielkość erozji w skali rocznej. Model został stworzony i zweryfikowany w górzystych obszarach Malezji w warunkach klimatu monsunowego [12]. Przydatność modelu potwierdzono w Indonezji [2] i Nepalu [14], został on również adoptowany do systemu GIS [4].

Analizy wykonano w systemie GIS (program ILWIS – Integrated Land Water Information System) dla średniej opadów z okresu 1999-2000 (rys. 1) reprezen-

tujących przeciętną wielkość opadu w zlewni. Wszystkie dane z wyjątkiem kohezji gleb oraz częściowo intercepcji i ewapotranspiracji uzupełnionych z tabel [11], zostały zebrane w terenie w latach 1998-2002.

Wartości energii kinetycznej deszczu obliczono wykorzystując paski pluwiograficzne dla stacji Cherrapunji i Shillong. Wykonano bazę danych opadowych przez interpolację średnich sum opadu (R), energii kinetycznej (I) i średniego opadu w dniu z opadem (R_o) między stacjami (rys. 1).

Skład granulometryczny 70 próbek materiału mineralnego określono metodą areometryczno-sitową. Analizy gęstości objętościowej gleby wykonano przy użyciu cylindrów Kopeckiego o objętości 100 cm³. Zawartość węgla organicznego określono metodą Tiurina, a połową pojemność wodną metodą desorpcji wody przy ciśnieniu 0,33 atmosfery w komorze Richardsa. Wyniki analiz, mapy geologiczne i topograficzne w skali 1:50 000 oraz glebowe w skali 1:250 000 posłużyły do stworzenia bazy geopedologicznej. Założono, że istnieje zależność między rzeźbą terenu i rodzajem gleb, a litologia, rzeźba i czas są głównymi czynnikami wpływającymi na formowanie się gleb. Z każdą jednostką wydzieloną na mapie związane zostały parametry fizyczne gleb: wskaźnik podatności gleby na erozję (K), połowa pojemność wodna (MS) i ciężar objętościowy (BD).

Wykorzystując mapy w skali 1:50 000, zdygitalizowano poziomice co 20 m i wykonano numeryczny model terenu, a następnie mapę nachyleń stoków (S).

Na zdjęciu satelity indyjskiego z 1998 r. (rozdzielczość 23 m) wydzielono formy użytkowania ziemi, które powiązano z parametrami roślinności (tab. 1).

Tabela 1. Parametry roślinności użyte w modelu

Table 1. Vegetation parameters used in model

Użytkowanie ziemi – Landuse	A	E_t/E_o	EHD	CC	PH	GC	C
Las subtropikalny wiecznie zielony gęsty Subtropical evergreen dense forest	0,35	1,00	0,20	0,98	15,0	0,98	0,001
Las subtropikalny wiecznie zielony zdegradowany Subtropical evergreen degraded forest	0,35	1,00	0,20	0,90	8,0	0,95	0,002
Las sosnowy Pine forest	0,35	1,00	0,20	0,95	0,5	1,00	0,001
Zbiorowiska traw Grasslands	0,30	0,90	0,15	0,80	0,5	1,00	0,005
Uprawy ziemniaka Potato cultivation	0,25	0,70	0,15	0,70	0,6	0,70	0,2
Uprawy ryżu Rice cultivation	0,43	1,35	0,12	0,60	0,8	0,60	0,1

 PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA MODELU

Model RMMF dzieli erozję na dwie fazy. W fazie wodnej oblicza energię opadu i wielkość spływu powierzchniowego. W fazie erozji oblicza wielkość oderwanych cząsteczek gleby od podłoża w wyniku rozbryzgu i splukiwania, porównując ją ze zdolnością transportu spływu powierzchniowego.

W pierwszym etapie obliczono wielkość opadu efektywnego (ER; mm), który sięga powierzchni gruntu po uwzględnieniu intercepcji (A):

$$ER = RA \quad (1)$$

Opad efektywny może osiągać powierzchnię gleby bezpośrednio (DT; mm) lub być zatrzymany przez sklepienie roślin (CC) i sięgać gleby w postaci opadu z liści (LD; mm):

$$DT = ER - LD \quad (2)$$

$$LD = ER \cdot CC \quad (3)$$

Energia kinetyczna opadu bezpośredniego (KE(DT); J·m⁻²) obliczona została równaniem Wischmeiera i Smitha [17]:

$$KE(DT) = DT(11,9 + 8,8 \log I) \quad (4)$$

Średnie z maksymalnych wartości natężenia opadu (*I*) z okresu 30-minutowego wyniosły 35 mm·h⁻¹ dla Cherrapunji i 25 mm·h⁻¹ dla Shillongu.

Energia kinetyczna opadu pośredniego (KE(LD); J·m⁻²) obliczona została w oparciu o zmierzoną wysokość roślin (PH) równaniem Brandta [3]:

$$KE(LD) = (15,8 \cdot PH^{0,5}) - 5,87 \quad (5)$$

Energia kinetyczna opadu (KE; mm) jest sumą opadu bezpośredniego i pochodzącego z liści:

$$KE = KE(DT) + KE(LD) \quad (6)$$

Rozbryzg (*F*; kg·m⁻²) jest iloczynem wskaźnika podatności gleb na erozję (*K*) obliczonego w oparciu o analizy uziarnienia i zawartość materii organicznej wzorem Wischmeiera i Smitha [17] oraz energii kinetycznej opadu (KE):

$$F = K \cdot KE \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Spływ powierzchniowy (*Q*; mm) obliczono równaniem Kirkbiego [7]. Spływ występuje gdy opad dobowy przekracza pojemność wodną gleby (*R_c*; mm):

$$R_c = 1000MS \cdot BD \cdot EHD(E_t/E_o) \quad (8)$$

$$Q = R \exp(-R_c/R_o) \quad (9)$$

Splukiwanie (H ; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) jest funkcją wielkości spływu powierzchniowego (Q), nachylenia stoków (S) i kohezji gleby (COH). Przyjmuje się, że odspojenie cząstek gleby od podłoża występuje tylko w miejscach, gdzie gleba nie jest okryta przez roślinność (GC):

$$H = (0,5\text{COH})^{-1} \cdot Q^{1,5} \cdot \sin S(1-\text{GC}) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Zmyw gleby (D ; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) jest sumą rozbryzgu (F) i splukiwania (H):

$$D = F + H \quad (11)$$

Zdolność transportu spływu powierzchniowego (TC; $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), zależna od wskaźnika okrywy roślinnej (C), spływu (Q) i nachylenia stoku (S), obliczona została równaniem Kirkbiego [7]:

$$\text{TC} = CQ^2 \sin S \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Zmyw gleby (D) jest porównywany ze zdolnością transportu spływu powierzchniowego (TC). Mniejsza z tych dwóch wartości określa wielkość erozji ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$):

$$\text{Erozja} = \min(D, \text{TC}) \quad (13)$$

WYNIKI I DYSKUSJA

Prognozowane przez model wartości erozji zawierają się w przedziale $0\text{-}145 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Najniższa erozja na polach ryżowych na ogół nie przekracza $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Dna dolin rzecznych z dominującą uprawą ryżu są obszarami akumulacji materiału erodowanego z pobliskich stoków, a wielkość erozji jest ograniczona małą zdolnością transportu spływu powierzchniowego.

Wysokie wartości erozji do $145 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ (średnio $60 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$) wykazują uprawy ziemniaków położone w północnej części zlewni w zasięgu wysokich $2500\text{-}6000 \text{ mm}$, ale nie ekstremalnych opadów. Wynika to z intensywnej gospodarki rolnej na krótkich i stromych stokach. Prognozowane przez model wyniki mieszczą się w szerokich granicach jakie stwierdzono na polatkach eksperymentalnych w okolicach Shillongu. Najwyższe wartości erozji notowano dla terenów z uprawą ziemniaków na stokach o nachyleniu $21\text{-}40^\circ$ – średnio między $41\text{-}56 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, a maksymalne do $180 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ [9,15].

W środkowej i południowej części zlewni Umiew najwyższe wartości erozji występują w obrębie lasu o różnym stopniu degradacji oraz podcięciach erozyjnych wzdłuż linii cieków. Wielkość erozji w gęstym lesie strefy tropikalnej jest na ogół mała [5,8]. Nawet jeśli wartości rozbryzgu są wysokie to cząsteczki gleby nie są transportowane na znaczne odległości, gdyż duża zdolność infiltracyjna gleby leśnej nie pozwala na formowanie się spływu powierzchniowego z wyjątkiem

sąsiedztwa pni dużych drzew i okolic cieków [6]. Równanie zdolności transportu spływu powierzchniowego (TC) przeszacowuje wielkość erozji wykazując, że w lesie przy opadach 8000-12000 mm spływ powierzchniowy jest większy od rozbryzgu. Brak pomiarów na poletkach doświadczalnych uniemożliwia jednak pełną kalibrację modelu w tej strefie. Stąd tylko szacunkowo można przyjąć wartość około $5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ za górną granicę naturalnej składowej erozji w gęstym lesie subtropikalnym.

Niskie wartości erozji, poniżej $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, występują na terenach zdegradowanych porośniętych trawami z wykształconym brukiem na powierzchni gleby. Erozja może tutaj wzrosnąć jedynie w przypadku rozcięcia warstwy szkieletu o średniej grubości 15 cm i wymycia gleby spod pancerza.

PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę ekstremalnie wysokie opady i duże spadki terenu można stwierdzić, że prognozowana wielkość erozji na przeważającym obszarze zlewni Umiew jest umiarkowanie wysoka [10]. Dna dolin są dobrze zabezpieczone przed erozją, ograniczoną zdolnością transportu spływu powierzchniowego, niezależnie od litologii, wielkości opadu czy rodzaju uprawy. Wysokie wartości erozji na polach roślin okopowych wynikają z intensywnej gospodarki rolnej na krótkich ale stromych stokach. W tak heterogenicznych warunkach środowiska przyrodniczego nie można jednak zalecić jednej, bezpiecznej granicy nachylenia stoków dla uprawy roślin okopowych. Na znacznym obszarze w strefie ekstremalnych opadów wartości erozji są niskie. Związane jest to z dwoma przeciwstawnymi zjawiskami: ochronną rolą lasu porastającego strome stoki oraz małą ilością cząstek spławialnych na płaskich i zdegradowanych terenach, gdzie faza intensywnej erozji wystąpiła w przeszłości. W tej strefie, na obszarze gęstego lasu subtropikalnego, równanie zdolności transportu przez spływ powierzchniowy przeszacowuje wartości i powinno być zmodyfikowane.

PIŚMIENNICTWO

1. **Agriculture and Soil Division, Indian Institute of Remote Sensing (IIRS):** Report on soil and landuse survey of Meghalaya. Dept. of Space, Govt. of India, Dehra Dun, 1987.
2. **Besler H.:** Slope properties, slope processes and soil erosion risk in the tropical rain forest of Kalimantan Timur (Indonesian Borneo). *Earth Surf. Processes Landforms*, 12, 195-204, 1987.
3. **Brandt C.J.:** Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops and throughfall drops. *Earth Surf. Processes Landforms*, 15, 687-698, 1990.
4. **De Jong S.M., Riezebos H.Th.:** Assessment of erosion risk using multi-temporal remote sensing data and an empirical erosion model. *Proceedings of the 3rd European Conference on Geographical Information Systems (EGIS'92)*, Munich, 23-26 March, 893-900, 1992.

5. **Douglas I.:** Man, vegetation, and the sediment yields of rivers. *Nature*, 215, 925-928, 1967.
6. **Dykes A.P., Thornes J.B.:** Hillslope hydrology in tropical rainforest steeplands in Brunei. *Hydrological Processes*, 14, 215-235, 2000.
7. **Kirkby M.J.:** Hydrological slope models: the influence of climate. In: *Geomorphology and climate* (Ed. E. Derbyshire). Wiley, London, 247-267, 1976.
8. **Larsen M.C., Torres-Sanchez A.J., Concepcion I.M.:** Slopewash, surface runoff and fine-litter transport in forest and landslide scars in humid-tropical steeplands, Luquillo experimental forest, Puerto Rico. *Earth Surf. Processes Landforms*, 24, 481-502, 1999.
9. **Mishra B.K., Ramakrishnan P.S.:** Slash and burn agriculture at higher elevations in North-Eastern India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 9, 69-82, 1983.
10. **Morgan R.P.C.:** Soil erosion and conservation. Longman, UK, 1986.
11. **Morgan R.P.C.:** A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model. *Catena*, 44, 305-322, 2001.
12. **Morgan R.P.C., Morgan D.D.V., Finney H.J.:** A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal Agricultural Engineering Research*, 245-253, 1984.
13. **Prokop P.:** The soils. In: *Rainfall, runoff and soil erosion in the globally extreme humid area, Cherrapunji region, India* (Eds L. Starkel, S. Singh.). *Prace Geograficzne*, 191, 31, 42-43, 2004.
14. **Shrestha D.P.:** Assessment of soil erosion in the Nepalese Himalaya: a case study in Likhu Khola Valley, Middle Mountain Region. *Land Husbandry*, 2, 1, 59-80, 1997.
15. **Singh G., Babu R., Narain P., Bhushan L.S., Abrol I.P.:** Soil erosion rates in India. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, 97-99, 1992.
16. **Van Lynden G.W.J., Oldeman R.L.:** The assessment of the status of human-induced soil degradation in South and Southeast Asia (ASSOD). ISRIC, Wageningen, 1997.
17. **Wischmeier W.H., Smith D.D.:** Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service Handbook, 537, Washington, 1978.

**MODELLING WATER EROSION IN THE MONSOONAL CLIMATE
OF THE MOST EXTREME RAINFALLS IN THE WORLD
(UMIEW CATCHMENT, MEGHALAYA HILLS, INDIA)**

Paweł Prokop

Department of Geomorphology and Hydrology of Mountains and Uplands
Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences
ul. św. Jana 22, 31-018 Kraków
e-mail: pawel@zg.pan.krakow.pl

Abstract. The study area is the Umiew catchment covering 500 km² in the area with the highest rainfalls in the world, reaching 12000 mm annually. The RMMF (Revised Morgan-Morgan-Finney) model is used in a GIS environment to assess soil loss. Annual soil erosion predicted by the model is moderate and ranges from 0 to 145 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. The results show that soil loss rates are the lowest in the valley bottoms under rice cultivation – below 1 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. The highest erosion rates are under potato cultivation on short and steep slopes with inclination up to 40°. The erosion rate of 5 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ was estimated as upper limit of average annual soil loss under dense subtropical forest in the area of the highest rainfalls.

Key words: soil erosion, erosion models, India