

Paweł Prokop

Zakład Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn IGiPZ PAN, Kraków
e-mail: pawel@zg.pan.krakow.pl

**EROZJA GLEB POD RÓŻNYMI SYSTEMAMI UPRAW
W KLIMACIE MONSUNOWYM WYŻYNY MEGHALAYA (INDIE)
I ZAPIS JEJ SKUTKÓW W POKRYWACH STOKOWYCH**

**Soil erosion under different cultivation systems in the monsoonal climate
of the Meghalaya Plateau (India) and record of its effects in slope deposits**

Abstract: The Meghalaya Plateau, located in NE India, forms hilly horst block elevated to about 2000 m a.s.l. In the subtropical monsoonal climate, with strong mean annual rainfall gradient from 11,000 mm in Cherrapunji to 2,200 mm in Shillong and 1,600 mm in Gauhati were developed several cultivation systems. The shifting cultivation is the oldest and predominant system at lower elevations (such near Gauhati). It induces soil loss of about $40 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ under cereals and perennial cropping on slopes up to $25\text{-}40^\circ$. As long as this system has long a cycle which permits forest regrowth on the abandoned fields, the effect of agricultural activity is not visible in the soil profiles. Intensive human activity (near Shillong), resulted in development of the sedentary agriculture, where soil erosion rates of about $55 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ are observed under potato cultivation. Radiocarbon dates of colluvial deposits in this area indicate intensification of agricultural human activity from at least 200-300 years. Closer to the southern margin of the plateau (near Cherrapunji), high monsoonal rainfall combined with cultivation in the past caused transformation of forest to grassland. The erosion below $2 \text{ t ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ indicates that compact pavement of soil and root grass system has exerted a greater control over the sediment transfer than the energy impact of the rainfall and overland flow. Only wet rice cultivation in populated valleys and creation of terraces does not threaten the environment. Various forms of agriculture and accelerated soil erosion lead to the gradual retreat of cultivated fields from high to low rainfall areas on the Meghalaya Plateau.

Słowa kluczowe: rolnictwo żarowo-odłogowe, ekstremalne opady, erozja gleb, Cherrapunji
Key words: shifting cultivation, extreme rainfall, soil erosion, Cherrapunji

WSTĘP

Natężenie erozji gleb na obszarach rolniczych w głównej mierze determinują warunki naturalne środowiska takie jak opady, cechy fizyczno-chemiczne gleb,

nachylenie stoków oraz system uprawy roślin (Morgan 1995). Indywidualność sposobu uprawy, wynikająca z adaptacji do środowiska przyrodniczego, widoczna jest w każdej strefie klimatycznej. Strefę tropikalną, w zasięgu klimatu monsunowego, wyróżniają: duża częstotliwość i wysokie sumy opadów w sezonie letnim, o natężeniach sięgających 75-100 mm h⁻¹ (Hudson 1982). Sprzyja to wymywaniu składników pokarmowych z gleb i prowadzi do szybkiego obniżenia ich żyzności, zwłaszcza pod uprawami na stromych stokach (El-Swaify 1997). Równocześnie dogodne stosunki termiczno-wilgotnościowe i długi sezon wegetacyjny, umożliwiają uprawę wielu gatunków roślin z 2-3 zbiorami w ciągu roku.

Ocenę strat gleby w takich warunkach utrudnia uprawa roślin o różnej wysokości, wieku, kształcie, szybkości wzrostu, wielkości biomasy, dynamice rozkładu szczątków organicznych, a także złożoność zabiegów agrotechnicznych, np. selektywne zbiory wybranych gatunków roślin. Wskutek tego dane o erozji w strefie tropikalnej są najczęściej szacunkowe i reprezentatywne dla niewielkiego obszaru. Dokonanie ekstrapolacji bezpośrednich wyników pomiarów za pomocą modeli erozji jest ograniczone, ponieważ większość z nich opracowana została dla strefy umiarkowanej.

Na Wyżynie Meghalaya, w warunkach najwyższych opadów na świecie, zmieniającej się wraz z wysokością termice i zróżnicowanej litologii, wykształciło się kilka systemów upraw typowych zarówno dla klimatu tropikalnego jak i umiarkowanego. Każdy z systemów wykazuje wewnętrzną zmienność organizacji prac polowych, rodzaju i kolejności uprawianych roślin oraz wydajności (Toky, Ramakrishnan 1981). Różny jest też ich stopień oddziaływania na środowisko.

Celem artykułu jest analiza zapisu i możliwości odczytu skutków długotrwałego oddziaływania spływu powierzchniowego i erozji gleb w pokrywach stokowych pod różnymi systemami upraw.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Zróżnicowane warunki środowiska przyrodniczego nie pozwoliły, jak dotąd, na stały monitoring strat gleby na dużym obszarze Wyżyny Meghalaya. Dlatego też, współczesne natężenie spływu powierzchniowego i erozji gleb przedstawiono na podstawie literatury w oparciu o średnie z 2-3 letnich pomiarów, wykonanych w latach 1977-82 przez Indian Council of Agricultural Research oraz North Eastern Hill University w Shillongu. Wyniki zaprezentowano na przykładzie trzech obszarów badawczych zlokalizowanych w okolicach Gauhati, Shillongu i Cherrapunji. Położenie miejscowości na przekroju N-S przez wyżynę, nawiązuje do gradientu opadowego oraz reprezentuje różne systemy upraw. Pomiarów wykonywano bezpośrednio na stokach pól uprawnych o nachyleniu 25-40°, gromadząc wodę i splukaną glebę w zbiornikach zagłębionych w ziemi. Jedynie dla

okolic Cherrapunji średnie straty gleby za ok. 45 lat oszacowane zostały przy wykorzystaniu aktywności radioizotopu cezu-137 w osadach stokowych.

Wyniki pomiarów uzupełniono własną analizą wysokości, natężenia i struktury opadów mierzonych przez Indian Meteorological Department na stacjach w Gauhati, Shillongu i Cherrapunji. Wykorzystując paski pluwiograficzne dla trzech stacji, określono w przedziałach 15-minutowych opady, które potencjalnie mogą uruchomić proces erozji gleb. Przyjęto przy tym reguły dla najczęściej stosowanego uniwersalnego równania strat gleb – USLE (Wischmeier, Smith 1978, Xie i in. 2002). Ponadto obliczono ilość opadów, które mogą zainicjować proces erozji zgodnie z zaleceniami N.W. Hudsona (1982) dla obszarów tropikalnych. Metoda zakłada, że tylko opady powyżej 25 mm h⁻¹ mają wystarczające natężenie, aby spowodować erozję. Wyniki opracowano dla 2000 r., kiedy opad na wyżynie był zbliżony do średniej wieloletniej (1901-2000).

W celu poznania budowy pokryw stokowych, utworzonych pod wpływem długotrwałej rolniczej działalności człowieka, wykonano w okolicach Gauhati, Shillongu i Cherrapunji 9 wkopów wzdłuż profili podłużnych stoków pod różnymi systemami upraw. Wybrane obszary nawiązują do miejsc, w których w latach 1977-82 przeprowadzano pomiary erozji i spływu powierzchniowego. Sprawdzono również na mapach topograficznych i zdjęciach satelitarnych, że sposób użytkowania ziemi w tych miejscach, nie zmienił się co najmniej od 100 lat (Prokop 2005b). Analizę składu granulometrycznego gleb wykonano metodą areometryczno-sitową. Zawartość materii organicznej oznaczono metodą Tiurina, a barwę profili glebowych w stanie naturalnym opisano za pomocą skali barw Munsella. Wiek bezwzględny osadów deluwialnych, związanych z gospodarką rolną, określono metodą radiowęglową. Wyniki przedstawiono na profilach pionowych: gleb i osadów, rozmieszczonych wzdłuż badanych stoków.

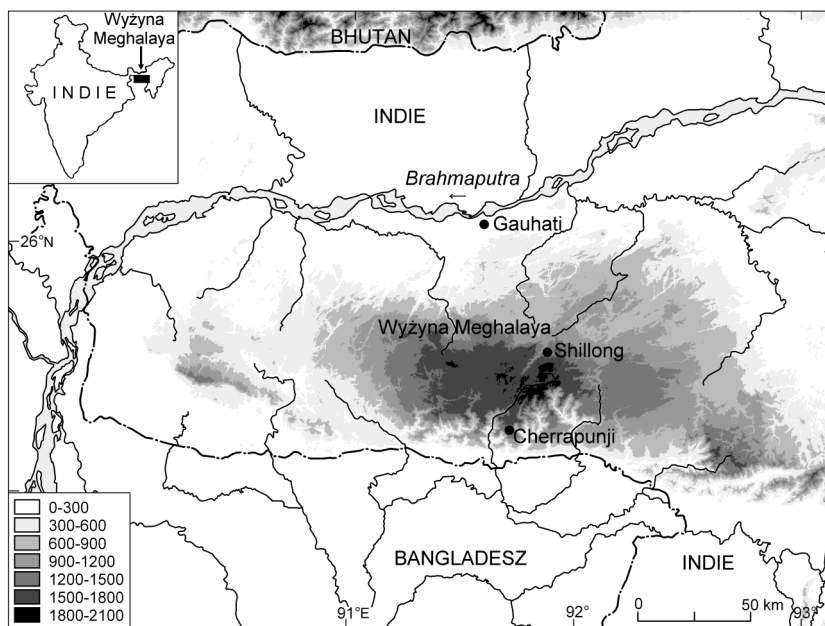
ŚRODOWISKO PRZYRODNICZE OBSZARU BADAŃ

Wyżyna Meghalaya położona w NE Indiach jest zrębem tektonicznym o charakterze pagórkowatego płaskowyzu, podniesionym w centralnej części do wysokości prawie 2000 m n.p.m. (rys. 1). Trzon wyżyny budują prekambryjskie gnejsy, kwarcyty i granity, jedynie jej południowa krawędź przykryta jest piaskowcami oraz wapieniami wieku kredowo-paleogeńskiego (GSI 1974). Północny skłon, wraz z centralną częścią wyżyny, okryty jest pokrywami zwietrzelinowymi o miąższości sięgającej kilkunastu metrów. Blżej południowej krawędzi płaskowyzu, na skałach osadowych, zalega cienka warstwa zwietrzliny z widocznymi miejscami wychodniami skalnymi.

Warunki klimatyczne Wyżyny Meghalaya kształtowane są przez deszczowy monsun południowo-zachodni w lecie i suchy monsun północno-wschodni w zimie. Średnia roczna temperatura zmienia się od 24°C u podnóża do 14°C na

wysokości 2000 m n.p.m. Położenie wyżyny na drodze południowo-zachodniego monsonu modyfikuje przestrzenny rozkład opadów. Południowy, bardziej stromy skłon wyżyny, wystawiony bezpośrednio na napływające wilgotne masy powietrza w czasie deszczowego monsonu, otrzymuje średnio 11000-12000 mm opadów rocznie (Cherrapunji). Wraz z oddalaniem się od krawędzi wyżyny suma opadu szybko maleje: do 2200-2400 mm (Shillong) w centralnej części płaskowyżu i do 1600 mm (Gauhati) u podnóża północnego skłonu. Na okres deszczowego monsonu (czerwiec-wrzesień) przypada 70% rocznych opadów. Miesiące zimowe są suche, z sumą opadów nie przekraczającą 100 mm (Prokop, Walanus 2003).

Gleby Wyżyny Meghalaya należą do żółto- i czerwonoziemów oraz brunatnoziemów (Singh 2005). W naturalnych warunkach, pod okrywą lasu, są to gleby kwaśne o pH poniżej 5,5 i dużej (do 9%) zawartości materii organicznej w poziomie próchnicznym.



Rys. 1. Położenie Wyżyny Meghalaya w NE Indiach (wysokości w m n.p.m.)

Fig. 1. Location of the Meghalaya Plateau in NE India (elevations in m a.s.l.)

Stoki wyżyny do wysokości 1000 m n.p.m. porastają naturalne wiecznie zielone, liściaste lasy tropikalne. Górne partie stoków są wylesione, z dużym udziałem zbiorowisk trawiastych i rzadko rozrzuconych wtórnych lasów sosnowych.

Ponad 80% z 2,3 mln mieszkańców Wyżyny Meghalaya żyje na wsi, a 65% utrzymuje się z rolnictwa. Duże przekształcenia środowiska przyrodniczego,

przy szybkim wzroście zaludnienia o ok. 3% rocznie, związane są z rolniczą działalnością człowieka.

OPADY

Opad odgrywa na wyżynie szczególną rolę ze względu na notowane najwyższe sumy roczne w skali globalnej oraz duże ich zróżnicowanie (Starkel, Singh 2004, Murata i in. 2007). Równocześnie brak istotnych statystycznie trendów w przebiegu opadów na stacjach Wyżyny Meghalaya w ostatnich 150 latach (Prokop, Walanus 2003), podobnie jak na pozostałym obszarze Indii (Parthasarathy 1984), pozwala założyć względnie stabilne warunki opadowe pod względem erozji gleb. W poszczególnych latach wysokość opadu oscyluje wokół średniej wieloletniej (współczynnik zmienności 15-22%, Prokop 2007). W okresie 1901-2000 zdarzały się natomiast pojedyncze lata z wyjątkowo wysokimi lub niskimi opadami, odpowiednio: 22760 mm w 1974 r. i 6800 mm w 1962 r. w Cherrapunji, 3490 mm w 1988 r. i 1430 mm w 1958 r. w Shillongu, czy 2500 mm w 1978 r. i 1050 mm w 1944 r. w Gauhati. W wybranym do analizy roku 2000, wysokość opadu na poszczególnych stacjach była zbliżona do średniej wieloletniej. Przebieg opadu w ciągu roku nawiązywał do typowej sezonowej zmienności warunków hydroklimatycznych na wyżynie, ze stosunkowo wilgotną wiosną, opadem skoncentrowanym w okresie monsunowym (ponad 70% opadu rocznego) i suchą zimą.

Odzwierciedleniem znacznych różnic w sumach rocznych opadu między badanymi stacjami jest średnia liczba dni z opadem: wyraźnie niższa w Gauhati, położonym w cieniu opadowym wyżyny, w porównaniu z Shillongiem i Cherrapunji (tab. 1). Wraz ze zbliżaniem się do południowej krawędzi wyżyny zwiększa się także w strukturze opadu udział wysokich opadów o dużych natężeniach. Około 2/3 opadów w Gauhati i Shillongu to opady o natężeniu poniżej 10 mm na dobę, podczas gdy w Cherrapunji stanowią one już tylko 28%. Opady dobowe powyżej 100 mm występują w Gauhati i Shillongu rzadko, natomiast w Cherrapunji stanowią one prawie 1/4 opadów, a co najmniej raz w roku opad dobowy przekracza 500 mm. Spostrzeżenia te potwierdza analiza zapisu pluwiograficznego. Średnie natężenie pojedynczych opadów nie przekracza $1,0 \text{ mm min}^{-1}$ w Gauhati i Shillongu oraz $2,0 \text{ mm min}^{-1}$ w Cherrapunji. Najwyższy opad w ciągu 15 minut osiągnął 19,5 mm, tj. $1,3 \text{ mm min}^{-1}$ w Shillongu i 53 mm, tj. $3,5 \text{ mm min}^{-1}$ w Cherrapunji.

Niespełna połowa sumy rocznej w Gauhati i Shillongu to opady potencjalnie mogące uruchomić erozję gleb. W Cherrapunji aż 80% sumy opadów rocznych to opady erozyjne. Uwidacznia się to również wyraźnie w ilości opadów o natężeniach przekraczających 25 mm h^{-1} , których jest dziesięciokrotnie więcej w Cherrapunji, w porównaniu z Shillongiem. Opady erozyjne w Gauhati i Shillongu występują od kwietnia do października, w Cherrapunji mogą się zdarzyć

Tabela 1. Charakterystyka opadów w Gauhati, Shillongu i Cherrapunji w 2000 r.
Table 1. Characteristic of rainfall at Gauhati, Shillong and Cherrapunji in 2000

Stacja	Gauhati	Shillong	Cherrapunji
Suma roczna opadu (mm)	1656	2297	12255
Suma roczna opadu erozyjnego (mm)	756	1034	10043
Energia kinetyczna opadu erozyjnego ($J\ m^{-2}$)	20328	26273	227705
Liczba dni z opadem	120	182	180
Liczba dni z opadem 0,1-10,0 mm	79	124	49
Liczba dni z opadem 10,0-50,0 mm	32	47	60
Liczba dni z opadem 50,0-100,0 mm	9	8	29
Liczba dni z opadem >100,0 mm	0	3	42
Liczba opadów erozyjnych	28	31	132
Absolutne maksymalne natężenie opadu w przedziale 15 min. ($mm\ h^{-1}$)	45	52	168
Liczba opadów >25 $mm\ h^{-1}$ z przedziału 15 min. (Hudson 1982)	34	40	457

w każdym miesiącu (rys. 2). Między czerwcem a sierpniem niemal każdy opad może zainicjować proces erozji.

NATĘŻENIE EROZJI GLEB POD RÓŻNYMI SYSTEMAMI UPRAW

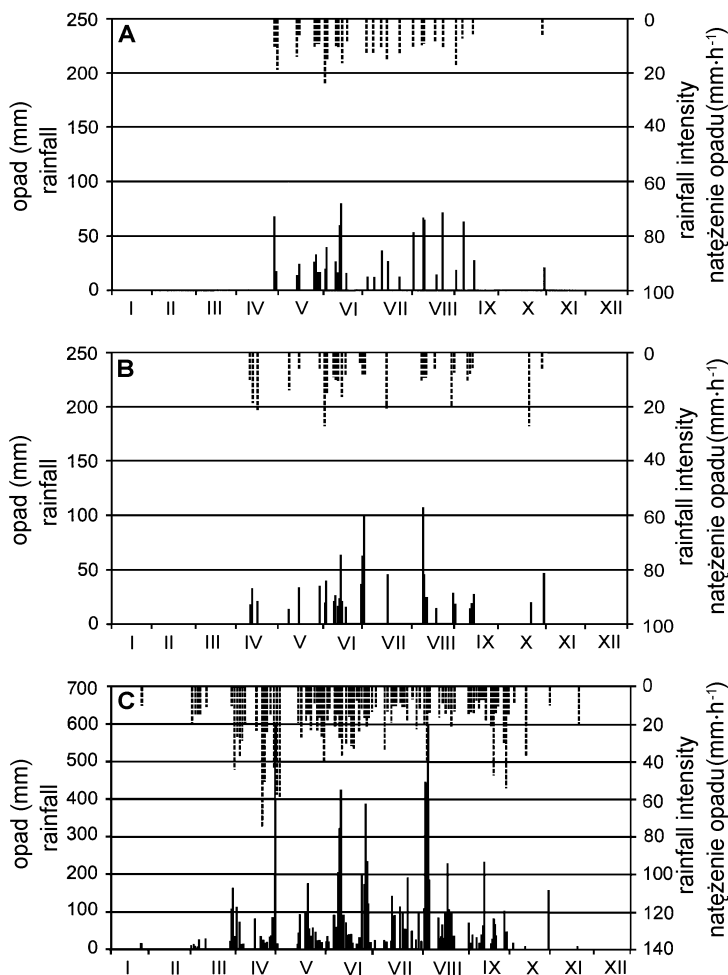
Najstarszym i zarazem najpowszechniejszym systemem uprawy na wyżynie jest rolnictwo żarowo-odłogowe, przetrwałe od neolitu, kiedy człowiek posiadał umiejętność wykorzystania ognia i przeszedł od łowiectwa i zbieractwa do uprawy zbóż. Jest ono dobrze dostosowane do mało żyznych gleb w obszarach tropikalnych i efektywne tak długo, jak istnieją wystarczające zasoby ziemi, lasu oraz występuje niewielka gęstość zaludnienia (Kostrowicki 1973).

W systemie żarowo-odłogowym las wycina się jesienią na stromym stoku, na powierzchni 2-3 ha. Wiosną spala się wysuszoną biomasę, wzbogacając glebę w materię organiczną. Wraz z nadejściem pierwszych opadów wysiewa się zboża (ryż, sezam, kukurydzę, proso), sadzi warzywa oraz drzewa owocowe. Zbiory odbywają się selektywnie, w zależności od kolejności dojrzewania roślin, od lata do późnej jesieni. Zazwyczaj po dwóch latach uprawy pole jest opuszczane, a rolnik zajmuje pod uprawę sąsiedni obszar lasu.

Rolnictwo żarowo-odłogowe dominuje w obszarach nisko położonych, gdzie przez cały rok panują wysokie temperatury powietrza. Przestrzenny zasięg upraw możemy określić na podstawie mapy pożarów, w miejscach karczowanych i wypalanych lasów, rejestrowanych przez satelity wiosną, jeszcze przed nadejściem opadów monsunowych (rys. 3).

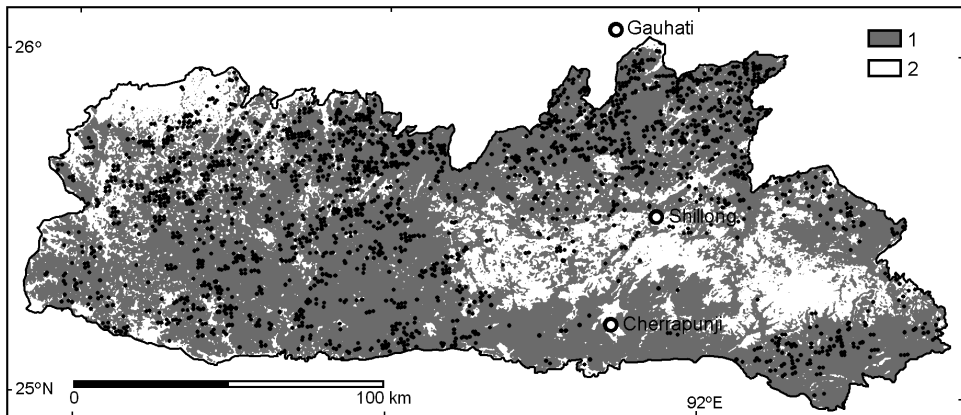
Złożony system uprawy powoduje, że natężenie erozji jest bardzo zróżnicowane czasowo i przestrzennie. Początkowo pnie i korzenie większych drzew, pozostawione po karczunku na polu uprawnym, powstrzymują rozwój erozji na

większą skalę. Zazwyczaj zagrożenie erozją wzrasta w drugim roku uprawy. Średnie natężenie erozji wynosi $40 \text{ t ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$, chociaż w poszczególnych latach z wysokimi opadami może lokalnie osiągać 2-3-krotnie wyższe wartości (Singh i in. 1981). Już w pierwszym roku po zaprzestaniu uprawy pole szybko zarasta zbiorowiskami traw i chwastów, a następnie lasem bambusowym. Po 20 latach pojawiają się drzewa, a po 50-100 latach nie można już wizualnie odróżnić lasu wtórnego od pierwotnego. Natężenie erozji w tym czasie szybko się zmniejsza z $7 \text{ t ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$ pod zbiorowiskami traw do $1 \text{ t ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$ w lesie naturalnym (Singh i in. 1981).



Rys. 2. Wysokość (słupki ciągłe) i natężenie (słupki przerywane) opadów erozyjnych w Gauhati (A), Shillongu (B) i Cherrapunji (C) w 2000 r.

Fig. 2. Amount (continuous bars) and intensity (dotted bars) of erosive rains at Gauhati (A), Shillong (B) and Cherrapunji (C) for the year 2000



Rys. 3. Pożary (czarne punkty) związane z rolnictwem żarowo-odłogowym na Wyżynie Meghalaya (w granicach stanu Meghalaya) zarejestrowane przez satelity Terra i Aqua między styczniem i majem w 2004 r.: 1 – las, 2 – rolnictwo osiadłe lub łąki

Fig. 3. Fires (black points) connected with the shifting cultivation in the Meghalaya Plateau (within Meghalaya state) registered by Terra and Aqua satellites between January and May for the year 2004: 1 – forest, 2 – settled agriculture or grasslands

Bardzo zbliżone wyniki pomiarów strat gleby, na polu z rolnictwem żarowym, otrzymano w sąsiadującym z Wyżyną Meghalaya regionie Chittagong Hills w Bangladeszu (Gafur i in. 2003). Średnie natężenie erozji w latach 1999-2000, przy rocznym opadzie ok. 3000 mm na stokach o nachyleniu od 1,5-75°, wyniosło 41 t ha⁻¹rok⁻¹. Po zaprzestaniu uprawy erozja zmniejszyła się do 3-4 t ha⁻¹rok⁻¹ na polu pozostawionym odłogiem.

Przy niewielkiej gęstości zaludnienia rzędu 10-20 os km⁻², system żarowo-odłogowy jest bezpieczny dla środowiska, ponieważ tylko 10% dostępnej powierzchni leśnej jest zajmowane pod uprawę (Whitmore 1975). Dopiero wzrost gęstości zaludnienia i skrócenie okresu odłogowania pola, nie pozwalające na odtworzenie lasu, mogą doprowadzić do znaczącego wzrostu erozji. Przykładem takiej ewolucji jest rolnictwo osiadłe w centralnej części Wyżyny Meghalaya, np. w okolicach Shillongu. B.K. Mishra i P.S. Ramakrishnan (1983) uważają, że przyczyną wykształcenia tego systemu uprawy jest postępujące skracanie okresu odłogowania pól – obecnie do 2-3 lat, związane z presją wzrastającej liczby ludności. Przedstawioną hipotezę wspiera znaczący wzrost gęstości zaludnienia na tym obszarze, z kilkunastu do 300 os km⁻² w ciągu ostatnich 100 lat.

W osiadłym systemie uprawy, łączone są elementy opisanej wcześniej gospodarki żarowo-odłogowej, z rzędową uprawą roślin okopowych (ziemniaków, kapusty), znaną ze strefy umiarkowanej. Brak lasu, czyli źródła odpowiednio dużej ilości biomasy, powoduje, że do spalenia wykorzystuje się dolne gałęzie

rzadko rosnących sosen oraz chwasty z sąsiednich, odłogowanych pól. Spalanie odbywa się pod okrywą gleby, co zapobiega jej szybkiemu wymywaniu przez spływ powierzchniowy. W takich warunkach gleba stanowi wystarczający izolator, aby ogień nie mógł zostać wykryty przez satelitę (por. rys. 3). Zasięg lasów liściastych i związanych z nimi pożarów, wyznacza równocześnie granicę między dwoma systemami upraw: żarowo-odłogowym i osiadłym.

W osiadłym systemie żarowym możliwe są dwa zbiory w ciągu roku, które zbiegają się z sezonem opadowym. Stwarza to duże zagrożenie erozją, która pod uprawami okopowymi osiąga średnio $55 \text{ t ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$, a około 30% wody opadowej odprowadzane jest z pola w postaci spływu powierzchniowego (Mishra, Ramakrishnan 1983). Sprzyja temu uprawa na krótkich, ale stromych stokach o nachyleniach sięgających nawet 40° . Po 2-3 latach uprawy, pole pozostawione jest odłogiem również na 2-3 lata. Sukcesja zbiorowisk trawiastych na polu odłogowanym powoduje, że natężenie erozji wyraźnie maleje do $4 \text{ t ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$. Stopniowy wzrost szorstkości podłoża i poprawa warunków infiltracyjnych gleby sprawiają, że na polu odłogowanym spływ powierzchniowy stanowi tylko 20% opadu rocznego.

Duże natężenie erozji na krótkich i stromych stokach pól uprawnych, w systemie osiadłym koło Shillongu, sprzyja szybkiemu transportowi i depozycji materiału w dnach dolin, wykorzystywanych pod osiadłą uprawę ryżu na nawadnianych polach. W tym przypadku, rzeźba terenu w skali lokalnej wyznacza granicę dwóch systemów rolnych: typowego dla strefy umiarkowanej, z uprawą roślin okopowych na stokach oraz, znanej ze strefy tropikalnej, uprawy ryżu w dnach dolin. Uprawa ryżu jest jedynym systemem uprawy, nie stwarzającym istotnego zagrożenia dla środowiska. Na stosunkowo płaskim polu ryżowym natężenie erozji, nawet przy dużym rozbryzgu, ograniczone jest małą zdolnością transportu cząstek gleby przez spływ powierzchniowy (Prokop 2005a).

Wraz ze zbliżaniem się do południowej krawędzi wyżyny wzrasta w strukturze użytkowania terenu udział powierzchni z nieciągłą pokrywą glebową. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne w okolicach Cherrapunji, gdzie działalność człowieka jako rolnika i hutnika doprowadziła do postępującego wylesiania w ostatnich kilkuset latach (Prokop 2007). Odsłonięta na działanie deszczu i spływ powierzchniowy płytka gleba, rozwinięta na odpornych na wietrzenie piaskowcach, została poddana intensywnej erozji. Doprowadziło to do wykształcenia słabo przepuszczalnego bruku o miąższości ok. 15 cm na powierzchni gleby lub ogłowienia profili glebowych do cokołu skalnego (Starkel, Singh 2004). Obecnie zbiorowiska traw, porastające szkieletowe gleby, wykorzystywane są pod wypas, a uprawa została ograniczona jedynie do ogródków przydomowych.

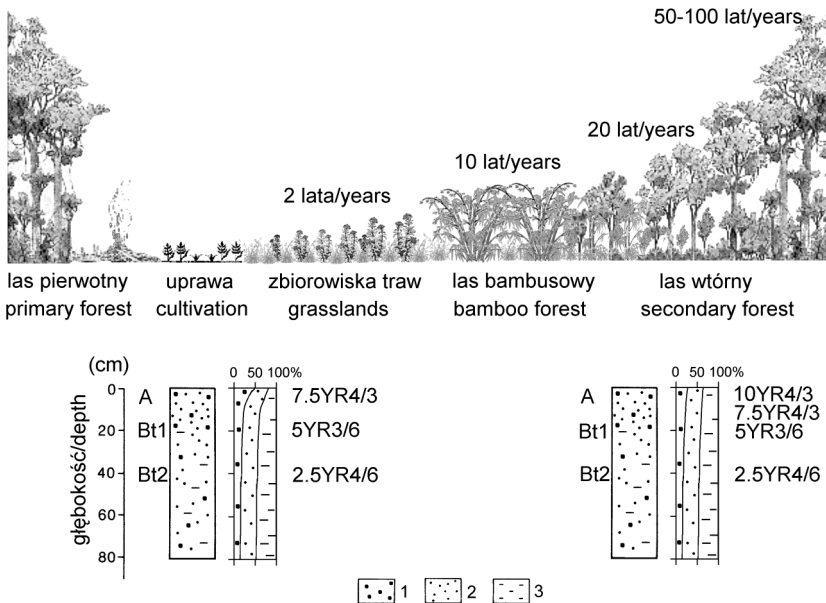
Zmiany, jakie zaszły w strukturze użytkowania terenu i budowie profili glebowych wpłynęły znacząco na przyspieszenie obiegu wody. Duży udział frakcji szkieletowej, obniżający pojemność wodną gleb powodują, że prawie 76% wody opadowej w obrębie łąk odprowadzane jest w postaci spływu powierzchniowego

(Ram 1986). Pomimo tego, natężenie erozji, wobec niedoboru frakcji spławialnej, wynosi jedynie $2 \text{ t ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$ (Froehlich 2004b).

Zachowane w okolicach Cherrapunji, kilkuhektarowe płaty naturalnego lasu liściastego, umożliwiają oszacowanie spływu powierzchniowego i erozji, zachodzących w warunkach, jakie kiedyś panowały na zalesionym płaskowyżu. Gęsty system korzeniowy drzew i runa leśnego oraz detrytus roślinny chronią glebę przed erozją i ułatwiają infiltrację wody w głąb pokryw stokowych (Budek, Prokop 2005). W takich warunkach jedynie 27% wody opadowej, w czasie deszczów o największym natężeniu, jest odprowadzane w postaci spływu powierzchniowego (Khiewtam 1986).

ZAPIS SKUTKÓW EROZJI GLEB W POKRYWACH STOKOWYCH

W przypadku systemu żarowo-odłogowego liczne szczątki organiczne pozostałe po uprawie na powierzchni gleby zmniejszają rozbryzg, a otaczający niewielkie pole las skutecznie ogranicza transport erodowanego materiału na więk-



Rys. 4. Sukcesja roślinności (opracowano na podstawie Toky, Ramakrishnan 1981, 1983) i profile gleby: zmieniony wskutek uprawy w systemie żarowo-odłogowym (lewy) i po dwudziestu latach od zaprzestania uprawy (prawy) w okolicach Gauhati: 1 – piasek, 2 – pył, 3 – il

Fig. 4. The succession of vegetation (based on Toky, Ramakrishnan 1981, 1983) and soil profiles: changed under shifting cultivation (left) and after twenty years of fallow (right) near Gauhati: 1 – sand, 2 – loam, 3 – clay

sze odległości. Śladem uprawy jest najczęściej zwiększenie udziału piasku, kosztem frakcji spławialnej, w powierzchniowym poziomie gleby (rys. 4). Widoczna jest również zmiana barwy gleby, wskutek zmniejszenia zawartości materii organicznej do 3-4%, czyli o połowę w stosunku do gleby w naturalnym lesie. Przez dłuższy czas mogą przetrwać w profilu glebowym, pozostałe po spalanej biomasy, węgle drzewne. Ich wartość interpretacyjną należy jednak traktować z ostrożnością, ponieważ mogą one pochodzić z naturalnych pożarów lasów. Ponadto węgle drzewne, ze względu na mniejszą gęstość niż otaczający je osad mineralny, łatwiej ulegają redepozycji.

Po uprawie, na opuszczone przez rolnika pole, bardzo szybko wkracza roślinność. Pod jej osłoną i przy aktywnym udziale mikroorganizmów rozwijają się procesy glebotwórcze. W takich warunkach, przy odpowiednio długim okresie odlogowania pola, rzędu 20-30 lat, pozwalającym na wyrośnięcie lasu, zapis skutków rolniczego użytkowania terenu staje się niewidoczny w profilu glebowym (rys. 4). Wyraźniej, skutki długotrwałej erozji, zapisują się w przypadku uprawy osiadłej w centralnej części wyżyny. Duży wpływ na charakter zapisu ma przy tym nie tylko system uprawy, ale także zróżnicowanie cech fizyczno-chemicznych gleb i osadów, w zależności od litologii.

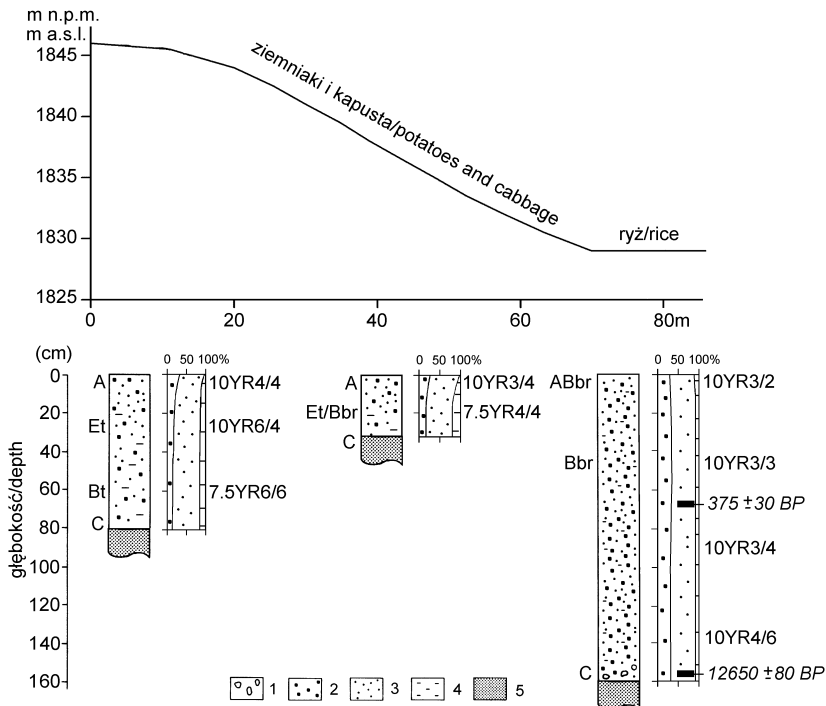
Na obszarze występowania kwarcytów miąższość pokryw zwietrzelinowych zbudowanych z jednorodnych pyłów piaszczystych sięga ok. 2-3 m. Profil wietrzeliowy skały macierzystej charakteryzuje się systematycznym spadkiem udziału frakcji piaszczystej z głębokością na rzecz wzrostu udziału frakcji pylastej (rys. 5). Na stoku zajęтым pod uprawę widać obniżenie miąższości profilu glebowego wskutek erozji o ok. 30-40 cm w stosunku do mniej narażonej na straty gleby wierzchowy. Na najsilniej erodowanych, wypukłych odcinkach stoku miejscami pokazują się wychodnie skalne.

Materiał spłukiwany ze stoków jest akumulowany w wąskich dnach dolin, gdzie jego miąższość sięga 2 m (rys. 5). Charakterystyczną cechą deluwii jest słabo zaznaczająca się inwersja uziarnienia w połączeniu z inwersją zawartości materii organicznej. W powierzchniowym poziomie osadów 0-20 cm, zawartość frakcji piaszczystej sięga 34%, a materii organicznej 3,3%. Udział piasku i materii organicznej wzrasta odpowiednio do 38% i 3,6% na głębokości 20-40 cm, by następnie ponownie zmniejszyć się wraz z głębokością. Może to wskazywać zarówno na erodowanie coraz głębszych poziomów glebowych na stoku, o coraz mniejszej zawartości frakcji piaszczystej i materii organicznej, jak i na stopniowo powiększający się niedobór biomasy spalanej dla użyznienia gleby, wraz z postępującym wylesianiem w ostatnim stuleciu. Wiek radiowęglowy osadów deluwialnych w obszarze kwarcytów określono na 375 ± 30 BP (Poz-34678) na głębokości 65-70 cm, a ich spąg położony na podłożu skalnym na $12\ 650 \pm 80$ BP (Poz-34680, rys. 5).

W obszarze granitów, sąsiadującym z kwarcytami, miąższość ziarnistych pokryw zwietrzelinowych sięga 15-20 m (widoczne odkrywki w kamienioło-

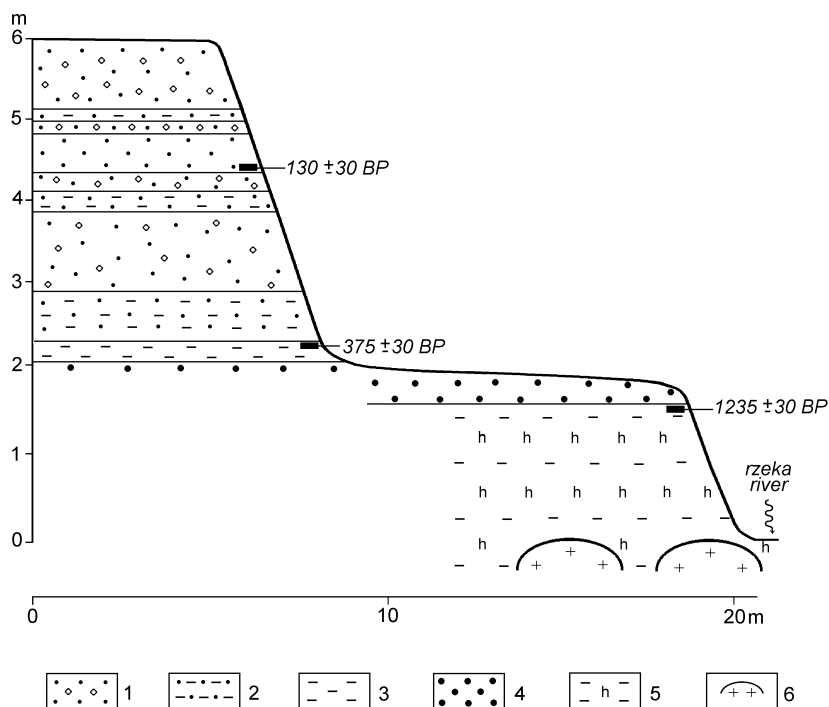
mach). Profil zwietrzelinowy skały macierzystej zbudowany jest w górnej części z piasków drobnoziarnistych z niewielką domieszką pyłów, przechodzących w gruboziarnistą, gruzowo-głazową zwietrzelinę. Na powierzchni stoków odsłaniają się trzony wietrzeniowe (*core stones*) świadczące o intensywnej erozji. Miąższość osadów w dnach dolin dochodzi do 4 m (rys. 6), a zawartość materii organicznej w deluwiach na ogół nie przekracza 2%. Stratyfikacja deluwiów nie odzwierciedla profilu wietrzeniowego skały macierzystej. Jedynie w spągu zaznaczają się utwory drobnoziarniste – gliny z domieszką piasku. Zalegają one na mułkach organicznych, pozostałych po dawnym zbiorniku wodnym i wskazują na początek erozji gleb. Gliny przykryte są, przemiennie warstwowanymi piaskami drobno- i gruboziarnistymi, ze żwirami do 2 cm. Ripplemarki na powierzchni niektórych warstw, jak również brak widocznych śladów procesów glebotwórczych w całym profilu, świadczą o szybkiej depozycji.

Bardzo zróżnicowane uziarnienie deluwiów może wskazywać, że pobliskie stoki były użytkowane nie tylko rolniczo. Zwietrzelina granitowa, o dużej za-



Rys. 5. Uprawa w systemie osiadłym (rośliny okopowe i nawadniany ryż) oraz profile gleb na stoku w okolicach Shillong: 1 – szkielet (>2 mm), 2 – piasek, 3 – pył, 4 – il, 5 – skała macierzysta (kwarcyt)

Fig. 5. Cultivation under settled system (root crops and wet rice) and soil profiles along slope near Shillong: 1 – coarse fragments (>2 mm), 2 – sand, 3 – loam, 4 – clay, 5 – parent rock (quartzite)

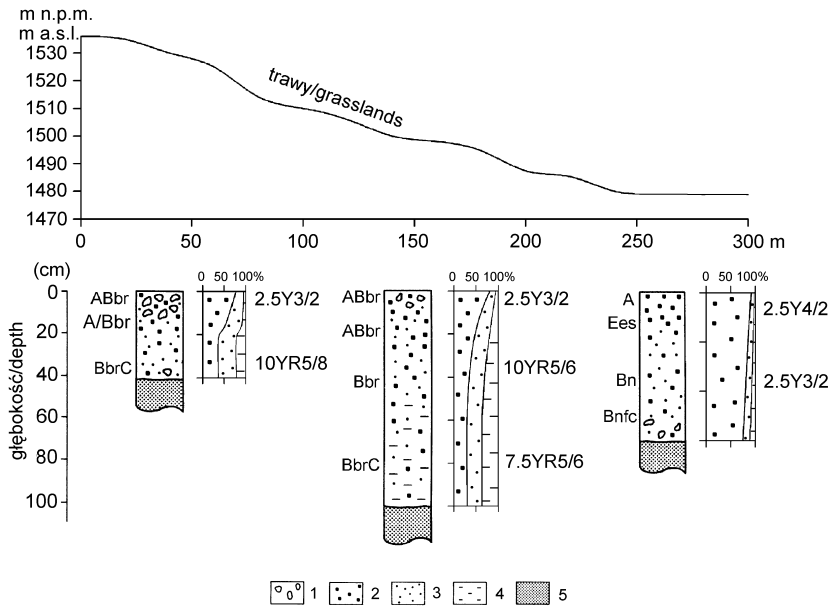


Rys. 6. Schematyczny przekrój osadów stokowych i jeziornych w obrębie batolitu Myllem koło Shillongu: 1 – piasek gruboziarnisty ze żwirami, 2 – glina piaszczysta, 3 – glina, 4 – piasek gruboziarnisty, 5 – mulki organiczne, 6 – głazy granitowe.

Fig. 6. Schematic cross-section of slope and lake deposits of Myllem batholith near Shillong: 1 – coarse sand with gravels, 2 – loamy sand, 3 – loam, 4 – coarse sand, 5 – loam with high organic matter content, 6 – granite boulders. Upper sand and loamy sand thick deposits are connected with erosion related to iron ore washing and cultivation cover former lake deposits – loam with high organic matter contents.

wartości magnetytu, była używana w tym rejonie jako surowiec do wytopu żelaza do połowy XIX w. (Prokop 2007). Warstwowanie może być więc również zapisem eksploatacji przez człowieka pokryw stokowych na różnej głębokości. Efektem tego była równoczesna ekspozycja, na działalność erozyjną deszczu i spływ powierzchniowy, horyzontów pokryw stokowych o bardzo zróżnicowanym uziarnieniu. Obecnie osady w dnach dolin o dużej zawartości piasku są eksploatowane na potrzeby budownictwa drogowego. Pozostała ich część zajęta jest pod uprawę w systemie osiadłym. Wiek deluwiów określono na 130 ± 30 BP (Poz-266) na głębokości 165 cm i 375 ± 30 BP (Poz-34680) na głębokości 380 cm (spąg deluwiów, rys. 6).

Z opisanymi powyżej: centralną częścią i północnym skłonem wyżyny, kontrastuje południowa krawędź płaskowyżu, przykryta słabo zwietrzałymi piaskowcami w okolicach Cherrapunji. Profil wietrzeniowy skały macierzystej jest



Rys. 7. Profile gleb na stoku porośniętym trawą (A) oraz na wierzchołku pod pierwotnym lasem liściastym i łąką (B) w okolicach Cherrapunji: 1 – szkielet (>2 mm), 2 – piasek, 3 – pył, 4 – il, 5 – skała macierzysta (piaskowiec)

Fig. 7. Soil profiles under primary deciduous forest and meadow near Cherrapunji: 1 – coarse fragments (>2 mm), 2 – sand, 3 – loam, 4 – clay, 5 – parent rock (sandstone)

plytki do 50 cm. Powierzchniowy poziom budują gliny piaszczyste o zawartości szkieletu do 5%, które przechodzą w gliny z udziałem szkieletu do 10%, zalegające na piaskowcu. Po wylesieniu i fazie intensywnej erozji, na dużych powierzchniach wierzchołków i stoków, odsłonięte zostały gazy nawet o średnicy 1 m oraz wychodnie skalne. W powierzchniowym poziomie płytkich gleb porośniętych trawami dominuje obecnie uziarnienie piasków gliniastych i glin piaszczystych, z udziałem frakcji szkieletowej przekraczającym 60% i zawartością materii organicznej do 3,6% (rys. 7). Wraz ze wzrostem głębokości, w profilu glebowym spada udział frakcji piaszczystej do 20-30% na głębokości 20 cm. Schodowy profil stoku związany jest z różnicami w odporności poziomo zalegających ławic piaskowca. Lokalne bariery topograficzne wraz z podnóżem stoku stanowiły strefę depozycji gleby erodowanej bezpośrednio po wylesieniu. Obecnie bruk, nawet w warunkach ekstremalnie wysokich opadów, skutecznie chroni zachowane resztki gleb przed dalszą erozją. W dnach dolin, okresowo podtapianych, niższe poziomy przemytych, piaszczystych osadów noszą ślady oglejenia. Jednak większość osadów z den dolin została wymyta wskutek intensywnej erozji bocznej niewielkich cieków, podczas częstych i gwałtownych wezbrań.

DYSKUSJA

Przedstawione wyniki badań wskazują, że zmienność natężenia erozji gleb w obu opisanych systemach rolnych: żarowo-odłogowym oraz osiadłym z zachowanymi elementami systemu żarowo-odłogowego, ma wspólną cechę – szybkie zmniejszenie strat gleby na polu odłogowanym po zaprzestaniu uprawy. Natężenie erozji spada wraz z wydłużaniem się okresu odłogowania pola. Jeśli jest on wystarczający dla odtworzenia pokrywy leśnej to zapis działalności rolniczej człowieka w profilu glebowym szybko zanika. Jedynym śladem uprawy mogą być węgle drzewne, których zazwyczaj większy rozmiar (od 1 mm do 2 cm), może pozwolić odróżnić je od pozostałości węgla drzewnych po naturalnych pożarach lasu (Whitlock, Larsen 2001).

Zapis skutków erozji gleb pod osiadłym systemem upraw w centralnej części wyżyny jest wyraźny uwarunkowany cechami strukturalnymi i teksturalnymi pokryw stokowych, które zależą od sposobu i tempa wietrzenia podłoża skalnego (Migoń, Traczyk 1998). Wpływa to z kolei na cechy fizyczno-chemiczne gleb i osadów. W przypadku granitów, a nawet kwarcytów, w klimacie monsunowym tworzą się pokrywy zwietrzelinowe o znacznej miąższości, które mogą być intensywnie erodowane przez długi czas. Dlatego też, w centralnej części płaskowyżu o wyraźnie wykształconych pokrywach zwietrzelinowych i przy średnich opadach rzędu 2000-3000 mm rocznie, zapis skutków erozji jest bardzo wyraźny i ma charakter ciągły.

W przypadku odpornych na wietrzenie piaskowców na południowej krawędzi płaskowyżu, tworzą się płytkie pokrywy zwietrzelinowe. Jeśli teren znajduje się w zasięgu wysokich opadów sięgających 12000 mm rocznie, największe natężenie erozji występuje bezpośrednio po wylesieniu (Soja, Starkel 2007). Po etapie cechującym duże straty gleby, następuje okres z niedoborem frakcji spławialnej, co powoduje, że niewielkie natężenie erozji nie odzwierciedla wysokości opadów (Froehlich 2004a). Równocześnie przyspieszenie spływu powierzchniowego sprzyja gwałtownym i częstym wezbraniom nawet niewielkich cieków i usuwaniu osadów z den dolin na drodze erozji bocznej (Prokop 2007). Może to utrudnić lub uniemożliwić rekonstrukcję rolniczej działalności człowieka na podstawie zapisu w osadach.

PODSUMOWANIE

Na Wyżynie Meghalaya można prześledzić historię rozwoju rolnictwa od systemu żarowo-odłogowego po osiadły. Gospodarka żarowa, powszechnie wiązana z początkami neolitu, przetrwała w niższych wysokościach wyżyny do czasów współczesnych, dzięki pozostawianiu przez długi czas w równowadze z ekosystemem leśnym. Krótki okres uprawy (do 2 lat), przy długim okresie odłogo-

wania pola (20-50 lat), na które szybko w warunkach klimatu monsunowego wkracza ponownie las, powoduje że skutki rolniczego użytkowania nie zapisują się trwale w profilu glebowym.

W miarę postępu agrotechnicznego i presji wzrastającej liczby ludności, system żarowo-odłogowy stopniowo zmieniał się w osiadłą gospodarkę rolną, widoczną obecnie w centralnej części wyżyny, w okolicach Shillongu. Intensywna uprawa z narastającą tendencją do skracania okresu odłogowania (2-3 lata uprawy i 2-3 lata odłogowania) powoduje, że roślinność leśna nie jest w stanie skolonizować opuszczonego na krótko pola. Większe natężenie erozji, w osiadłym systemie uprawy, uwidacznia się zarówno w degradacji profili glebowych na stoku, jak i depozycji deluwiiów o znacznej miąższości sięgającej 2-4 m. Zapis rolniczej działalności człowieka jest tutaj najwyraźniejszy, chociaż zróżnicowany w zależności od cech strukturalnych i teksturalnych pokryw stokowych. Wiek deluwiiów, określony metodą radiowęglową, wskazuje na nasilenie rolniczej działalności człowieka w tym obszarze w ostatnich 200-300 latach.

Gospodarka taka, w warunkach wysokich opadów, może doprowadzić do niemal całkowitej degradacji pokrywy glebowej i trwałego zaniku pól uprawnych w strukturze użytkowania terenu, jak to się stało w rejonie Cherrapunji. Większość erodowanej gleby została już odprowadzona z podnóży stoków i den dolin bezpośrednio po wylesieniu. Obecnie, występowanie silnie szkieletowego bruku na powierzchni gleby, w połączeniu z wysokim spływem powierzchniowym, ogranicza ponowne wytworzenie dużej ilości zwietrzeliny, a tym samym proces erozji. Wykształcony nowy system środowiska, uniemożliwia zapisanie skutków działalności człowieka w pokrywach stokowych na południowej krawędzi Wyżyny Meghalaya.

PODZIĘKOWANIA

Badania sfinansowano z projektu MNiSW NN306 426434 przy współpracy z Department of Science and Technology oraz Indian National Science Academy w Indiach. Dziękuję prof. S. Singhowi i dr. H.J. Syiemliehowi z North Eastern Hill University w Shillongu za pomoc w pracach terenowych.

Literatura

- Budek A., Prokop P., 2005, Mikromorfologiczne cechy pokryw glebowych obszaru o najwyższych opadach na świecie - Cherrapunji, Wyżyna Meghalaya, Indie, *Przeegl. Geol.* 53, 4, 293–298.
- El-Swaify S.A., 1997, Factors affecting soil erosion hazards and conservation needs for tropical steplands, *Soil Technology* 11, 3–16
- Froehlich W., 2004a, Soil erosion in experimental catchment, [w:] L. Starkel, S. Singh

- (red.), *Rainfall, runoff and soil erosion in the globally extreme humid area, Cherrapunji region, India*, Prace Geogr. 191, 81-89.
- Froehlich W., 2004b, Soil erosion, suspended sediment sources and deposition in the Maw-Ki-Syiem drainage basin, Cherrapunji, northeastern India, [w:] V. Golosov, V. Belyaev, D.E. Walling (red.), *Sediment transfer through the fluvial system*, IAHS Publication 288, 138–146
- Gafur A., Jensen J.R., Borggaard O.K., Petersen L., 2003, Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation (jhum) in the Chittagong Hill Tracts of Bangladesh, *Journal of Hydrology* 274, 30–46.
- GSI, 1974, Geology and mineral resources of the states of India, part IV, Meghalaya, Geological Survey of India, *Miscellaneous Publication* 30, 69–90.
- Hudson N.W., 1982, *Soil Conservation*, London, Batsford.
- Khiewtam R.S., 1986, *Ecosystem function of protected forests of Cherrapunji and adjoining areas*, Praca doktorska, North-Eastern Hill University, Shillong.
- Kostrowicki J., 1973, *Zarys geografii rolnictwa*, PWN, Warszawa.
- Migoń P., Traczyk A., 1998, Pokrywy stokowe – środowisko powstawania i cechy diagnostyczne, [w:] E. Mycielska-Dowgiałło (red.), *Struktury sedymentacyjne i postsedymencyjne w osadach czwartorzędowych i ich wartość interpretacyjna*, WGiSR UW, Warszawa, 285–301.
- Mishra B.K., Ramakrishnan P.S., 1983, Slash and burn agriculture at higher elevations in north-eastern India, I. Sediment, water and nutrient losses, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 9, 69–82.
- Morgan R.P.C., 1995, *Soil Erosion and Conservation*, Longman.
- Murata F., Hayashi T., Matsumoto J., Asada H., 2007, Rainfall on the Meghalaya plateau in northeastern India – one of the rainiest places in the world, *Natural Hazards* 42, 2, 391–399.
- Parthasarathy B., 1984, Interannual and long-term variability of Indian summer monsoon rainfall, *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planetary Science)* 93, 371–385.
- Prokop P., 2005a, Modelowanie erozji wodnej w klimacie monsunowym o najwyższych na świecie opadach (zlewnia UMIEW, Wyżyna Meghalaya, Indie), *Acta Agrophysica* 5, 1, 121–128.
- Prokop P., 2005b, Natural hazards and anthropogenic impact on environment in a tropical mountain catchment, Meghalaya Hills, India, *St. Geomorph. Carpatho-Balcanica* 39, 95-113.
- Prokop P., 2007, Degradacja środowiska przyrodniczego południowego skłonu Wyżyny Meghalaya, Indie, *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 210.
- Prokop P., Walanus A., 2003, Trend and periodicity in the longest instrumental rainfall series for the area of most extreme rainfall in the world, northeast India, *Geographia Polonica* 76, 2, 25–35.
- Ram S.C., 1986, *Ecosystem structure and function of seral communities of degraded environment at Cherrapunji and adjoining areas*. Praca doktorska, North-Eastern Hill University, Shillong.
- Singh R.S., 2005, *Soil Series of Meghalaya*, Technical Bulletin, 121, NBSS&LUP, Nagpur.
- Singh G., Babu R., Chandra S., 1981, *Soil Loss Predictions in India*, CS&WCRTI, Bulletin No 12/D9, Dehra Dun India.
- Soja R., Starkel L., 2007, Extreme rainfalls in Eastern Himalaya and southern slope of Meghalaya Plateau and their geomorphologic impacts, *Geomorphology* 84, 170–180.
- Starkel L., Singh S. (red.), 2004, *Rainfall, runoff and soil erosion in the globally extreme humid area, Cherrapunji region, India*, Prace Geogr. IGiPZ PAN 191.

-
- Toky O.P., Ramakrishnan P.S., 1981, Cropping and yields in agricultural systems of the North-Eastern hill region of India, *Agro-Ecosystems* 7, 11–25.
- Toky O.P., Ramakrishnan P.S., 1983, Secondary succession following slash and burn agriculture in North-Eastern India, 1, Biomass, litterfall and productivity, *Journal of Ecology* 71, 735–745.
- Whitlock C., Larsen C., 2001, *Charcoal as a fire proxy*, [w:] J.P. Smol, H.J. Birks, W.M. Last (red.), *Tracking environmental change using lake sediments, vol. 3, Terrestrial, algal and siliceous indicators*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
- Whitmore T.C., 1975, *Tropical Rain Forests of the Far East*, Clarendon Press, Oxford.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978, *Predicting Rainfall Erosion Losses*, USDA Agricultural Research Service Handbook, 537, Washington.
- Xie Y., Liu B., Nearing M.A., 2002, Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms, *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 45, 6, 1843–1847.