

Zastosowanie GIS i metod teledetekcji do oceny degradacji środowiska przyrodniczego południowego skłonu Wyżyny Meghalaya, Indie

Application of GIS and remote sensing in evaluation of land degradation of the southern slope of the Meghalaya Plateau, India

Paweł PROKOP

The Meghalaya Plateau represents an area where natural hazards combined with human activity have accelerated the environmental degradation processes leading in many places to complete degradation of vegetation cover and soils. Studies carried on in the Umiew catchment of 493.7 km² on the background of the southern slope that covers an area of 10 920 km² show that land degradation can be result of three factors: natural extreme events, expansion of shifting cultivation connected with the population growth and mineral extraction.

The relative importance of extreme events like heavy rainfall and earthquakes differs between two major landforms and connected with them land use forms: the forested deep canyons and the degraded grass covered hilly plateau. The area of the canyon with steep slopes is most sensitive on mass movements triggered by extreme rainfalls and earthquakes. The regional continuous heavy rains with 20–25% of annual precipitation in 3–4 days may give to water level rise and cause landsliding on steep but forested slopes. These types of extreme events are rare and occur once on dozens of years. Shallow landslides are induced several times during each year. Severe earthquakes ($M > 7.0$) may trigger rock falls and landslides of which material fills rivers bed up to few meters high and changes rivers channel regime. The most degraded

area of plateau covered by grasslands is very resistant on extreme events. The highest soil erosion rates were in the past and present-day hillslope erosion is very low. Only cultivable land with thicker weathered cover is prone on landslides and soil erosion rates are highest here.

The factor, which contributed to the permanent degradation of the natural environment was the man. However, the hypothesis connecting deforestation with the shortening of the shifting cultivation cycle, as a consequence of the demographic growth, contradicts the decrease in forested areas that occurred before, the impact of the substantially increased population in the second half of the 20th century.

The close relationship between the location of the centres of the iron manufacturing in the middle of the 19th century, and deforested areas on the hilly plateau, led to the formulation of the hypothesis that a major cause of deforestation was the production of the charcoal required for the smelting of iron. Due to the long duration of human activity with successive periods of land clearing and abandonment, most of the primary subtropical forests have been degraded to grass formations. An additional cause of land use/cover change such as like limestone and coal mining or population increase, have contributed less or later on their share in land degradation.

Wprowadzenie

Południowy skłonu Wyżyny Meghalaya (10 920 km²) jest obszarem o dużej częstotliwości występowania zdarzeń ekstremalnych i równocześnie długim okresie użytkowania zasobów naturalnych przez człowieka. Położona na południowym skłonie wyżyny zlewnia Umiew (493,7 km²), między Cherrapunji a Mawsynram, otrzymuje najwyższe opady w skali światowej sięgające średnio 11 000 mm, a maksymalnie nawet 24 000 mm w ciągu roku.

Pomimo sprzyjających warunków termiczno-wilgotnościowych dla rozwoju lasu, w krajobrazie płaskowyżu powyżej 1000 m n.p.m. dominują zbiorowiska traw z płatami wtórnych lasów sosnowych, porastające zdegradowane gleby. Jednocześnie pozostałości płatów klimaksowego, subtropikalnego lasu liściastego w różnych częściach wyżyny wskazują, że teren ten był porośnięty lasem w holocenie (Starkel, Singh, 2004; Prokop, 2005).

Studia nad degradacją ekosystemów leśnych pozwoliły na sformułowanie hipotezy, że główną przyczyną

wylesienia i degradacji gleb w wyższych partiach Wyżyny Meghalaya, było karczowanie i wypalanie lasów zajmowanych pod uprawę w wyniku wzrastającej liczby ludności. Wtórny las, który pojawiał się na opuszczonym przez rolnika polu był ponownie karczowany jednak nie dawał już wystarczającej biomasy do spalania i użytkowania gleby. Miało to doprowadzić do wyjałowienia gleby i stopniowego przekształcenia naturalnego lasu liściastego w formację traw (Ramakrishnan 1992).

Celem opracowania jest określenie przyczyn degradacji środowiska przyrodniczego południowego skłonu Wyżyny Meghalaya poprzez weryfikację przedstawionej hipotezy i analizę związków przyczynowo-skutkowych między zjawiskami ekstremalnymi a czynnikami antropogenicznymi.

Złożone pojęcie degradacji środowiska przyrodniczego opisujące, w jaki sposób zasoby naturalne wyczerpują się lub ich jakość ulega pogorszeniu (Stocking, Murnaghan, 2000) powoduje konieczność użycia różnorodnych metod badawczych. Geograficzne Systemy Informacyjne (GIS) zostały potraktowane jako narzędzie integracji danych pozyskanych metodami teledetekcyjnymi i uzupełniające, obok innych metod, ocenę przemian środowiska przyrodniczego.

Materiały i metody

Opracowanie zostało oparte o trzy rodzaje źródeł: dane publikowane, dane teledetekcyjne i badania terenowe. Dane publikowane obejmują mapy topograficzne zlewni Umiew w skali 1:63 360 z 1910 roku i 1:50 000 z lat 1966–1967, mapy topograficzne Wyżyny Meghalaya w skali 1:253 440 z 1911 roku, mapy geologiczne i glebowe. Ponadto wykorzystano dane demograficzne (Census of India, 1872–2001) wraz z bazą danych o światowym zaludnieniu LandScan Global Population Database, w wersji z 2002 roku, pozyskaną ze strony internetowej <http://www.ornl.gov/gist/landscan/index.html> oraz dane meteorologiczne. Dane teledetekcyjne objęły zdjęcie satelity indyjskiego IRS-1D z 1998 roku, w rozdzielczości przestrzennej 23,5 x 23,5 m, zdjęcia satelitarne satelity Landsat TM z lat 1987–1991 oraz Landsat 7 ETM+ z lat 1999–2002 w rozdzielczości przestrzennej 28,5 x 28,5 m, numeryczny model wysokościowy terenu SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) oraz mapy pożarów zarejestrowanych przez satelity Terra i Aqua od stycznia do maja w latach 2003–2005 pozyskane z serwera Web Fire Mapper (<http://maps.geog.umd.edu/>). Podczas badań terenowych wykonano kartowanie zespołów form rzeźby terenu, zweryfikowano zasięg jednostek geologicznych oraz pokrycia i użytkowania terenu na zdjęciach satelitarnych, a także pobrano 70 prób gleby do analiz laboratoryjnych.

Do analiz GIS i integracji map, zdjęć satelitarnych, danych statystycznych oraz wyników analiz laboratoryjnych wykorzystano program ILWIS (International Institute..., 1997). Mapy topograficzne, geologiczne i glebowe zostały zeskanowane z rozdzielczością 300 dpi

i rektyfikowane do odwzorowania uniwersalnego pro-przecznego Merkatora (UTM) z elipsoidą odniesienia WGS84. Odwzorowanie to przyjęto dla wszystkich map i zdjęć satelitarnych analizowanych w systemie GIS. Zasięgi obszarów leśnych, jednostek litologicznych i glebowych zostały zdigitalizowane i zapisane w formacie rastrowym z rozdzielczością przestrzenną 20 x 20 m w przypadku map w skalach 1:63 360 i 1:50 000 oraz 28,5 x 28,5 m w przypadku map w skalach 1:253 440. Zastosowane rozdzielczości przestrzenne nawiązują w przybliżeniu do wielkości pikseli na zdjęciach satelitarnych odpowiednio satelitów IRS-1D oraz Landsat TM i ETM+.

W oparciu o kanały 2 i 3 zdjęcia satelity IRS-1D z listopada 1998 roku obliczono znormalizowany wskaźnik roślinności (NDVI) wzorem:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

gdzie: *NIR* – zdjęcie w paśmie bliskiej podczerwieni
R – zdjęcie w paśmie czerwonym

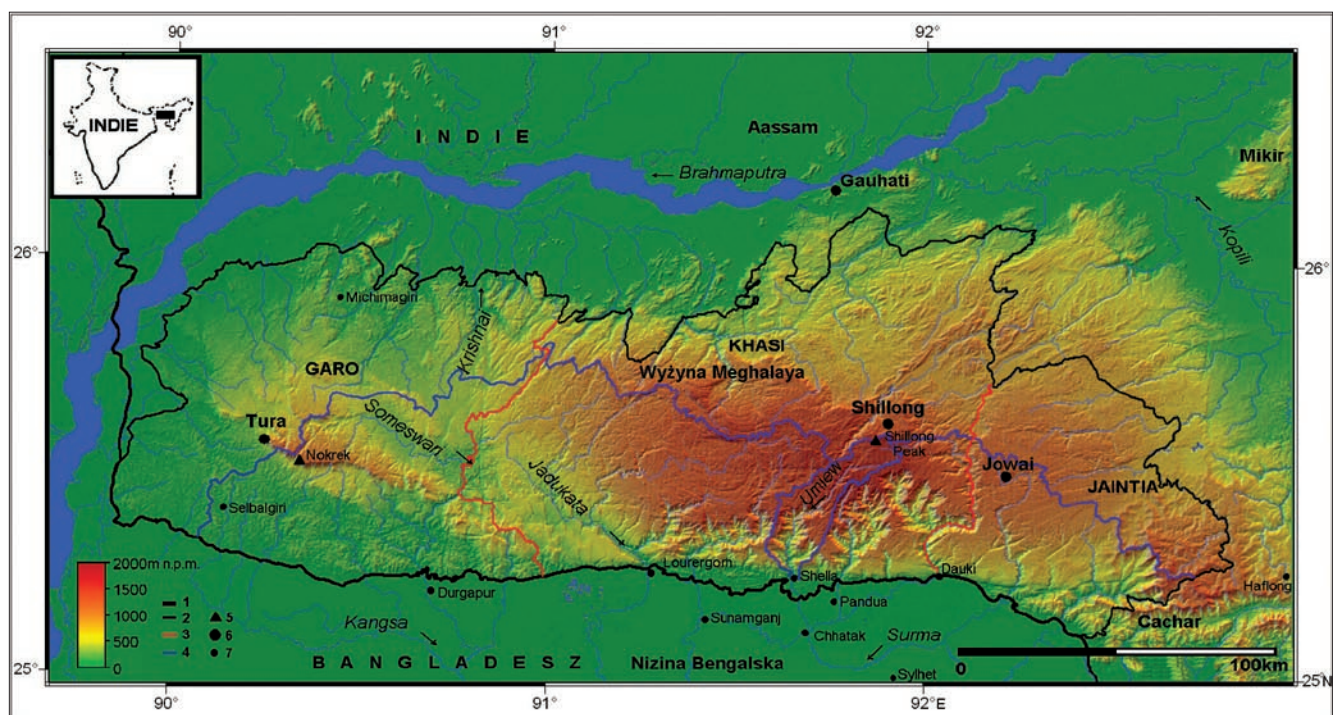
W celu usunięcia szumów otrzymany obraz przefiltrowano filtrem mediany. Mapa numeryczna z obliczonym wskaźnikiem posłużyła do klasyfikacji lasów w zlewni Umiew. Tę samą procedurę zastosowano do obliczenia wskaźnika NDVI dla oceny współczesnego pokrycia przez lasy całej Wyżyny Meghalaya w oparciu o zdjęcia satelity Landsat ETM+. Ze względu na zbliżone wartości odbicia wykonano jedynie korekcję atmosferyczną, poprzez odjęcie najciemniejszych pikseli w kanałach 3 i 4 (Ciołkosz, Kęsik, 1989).

Do wizualnej analizy dynamiki współczesnych procesów grawitacyjnych w dorzeczu Umiew, użyto sekwencji barwnych kompozycji FCC (*False Color Composite*) wykorzystując zdjęcia z kanałów 4, 3, 2 scen satelity Landsat TM z lat 1987, 1988 i 1991.

Środowisko przyrodnicze

Wyżyna Meghalaya jest zrębem tektonicznym, oddzielnym doliną Brahmaputry od Himalajów na północy i uskokiem Dauki od Niziny Bengalskiej na południu (ryc. 1). Trzon wyżyny o charakterze płaskowyżu, o średniej wysokości 1500 m n.p.m. i z najwyższymi szczytami, przekraczającymi 1900 m n.p.m., budują prekambryjskie kwarcyty i gnejsy, w które wdarły się intruzje granitowe. Południowa krawędź wyżyny przykryta została w kredzie i paleogenie zalegającymi niemal poziomo piaskowcami z wkładkami węgla oraz wapieniami (GSI, 1974).

Budowa geologiczna i rzeźba zlewni Umiew nawiązują do historii rozwoju południowego skłonu Wyżyny Meghalaya. Górna część zlewni ma rzeźbę dojrzałą, falisto-pagórkowatą, rozwiniętą na skałach metamorficznych i granitach (ryc. 2). W środkowej części rzeka stopniowo wcina się w skalne podłoże płynąc kanionem o stromych zboczach modelowanych przez procesy erozyjne i grawitacyjne. Górne krawędzie doliny, tworzą



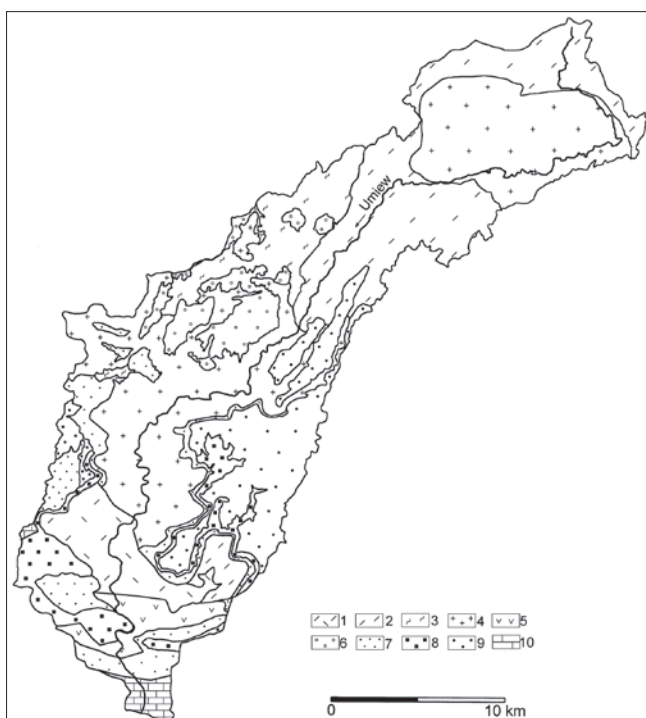
Ryc. 1. Położenie Wyżyny Meghalaya i zlewni Umieiw

1 – granice państw, 2 – granice stanów, 3 – granice historycznie ukształtowanych jednostek administracyjnych Garo, Khasi i Jaintia Hills, 4 – granice południowego skłonu wyżyny i zlewni Umieiw (dział wodny), 5 – najwyższe wzniesienia, 6 – główne miasta, 7 – pozostałe miejscowości

Fig. 1. Location of the Meghalaya Plateau and the Umieiw catchment

1 – international boundaries, 2 – state boundaries, 3 – boundaries of historical administrative units Garo, Khasi i Jaintia Hills, 4 – boundaries of the southern slope of Meghalaya and Umieiw catchment (water divide), 5 – peaks, 6 – main cities, 7 – other places

pionowe ściany dwóch strukturalnych platform Maw-synram i Cherrapunji, zbudowanych z poziomo zalegających piaskowców, rozciągniętych płaskodennymi dolinami,



których wyloty kończą się wodospadami o wysokości 200–400 m. W ujściowym odcinku Umieiw przediera się przez odsłonięty trap bazaltowy oraz strefę piaskowców i wapieni zrzuconego skrzydła uskoku Dauki. Osiągając Nizinę Bengalską, Umieiw łączy się z Surmą na wysokości ok. 60 m n.p.m.

Warunki klimatyczne Wyżyny Meghalaya kształtowane są przez deszczowy monsun południowo-zachodni w lecie i suchy monsun północno-wschodni w zimie. Średnie roczne temperatury zmieniają się od 24°C u ujścia Umieiw do 14°C na wysokości prawie 2000 m n.p.m. (tab. 1). W lipcu średnie wieloletnie temperatury wszędzie przekraczają 20°C, natomiast w styczniu średnie temperatury w szczytowych partiach spadają poniżej

Ryc. 2. Budowa geologiczna zlewni Umieiw

1 – gnejsy (archaik), 2 – kwarcyty (proterozoik), 3 – fyllity (proterozoik), 4 – granity (proterozoik), 5 – bazalty (jura), 6 – zlepińce (kreda), 7 – piaskowce glaukonitowe (kreda), 8 – piaskowce żelaziste (eocen), 9 – piaskowce wapieniste (eocen), 10 – wapień (eocen)

Fig. 2. Geology of the Umieiw catchment

1 – gneisses (Archaean), 2 – quartzites (Proterozoic), 3 – phyllites (Proterozoic), 4 – granites (Proterozoic), 5 – basalts (Jurassic), 6 – conglomerates (Cretaceous), 7 – glauconitic sandstones (Cretaceous), 8 – ferruginous sandstones (Eocene), 9 – calcareous sandstones (Eocene), 10 – limestones (Eocene)

Tabela 1. Średnie roczne charakterystyki klimatu dla stacji w okolicach zlewni Umiew w latach 1901–2000

Average annual climate characteristics for stations around Umiew catchment for the years 1901–2000

Stacja Station	Wysokość (m n.p.m.) Altitude (m a.s.l.)	Temperatura Temperature (°C)	Opad Rainfall (mm)	Ewapotranspiracja potencjalna Potential evapotranspiration Eto (mm)
Shillong	1500	16,6	2199	775
Mawphlang	1840		3507	
Cherrapunji	1313	17,3	11329	794
Mawsynram*	1420		11882	
Sylhet	35	24,2	4202	1309

*średnie za lata 1940–2000, average for the years 1940–2000

10°C. Na wyższych wysokościach, prawie co roku notowane są przygruntowe przymrozki i raz na kilkanaście lat niewielkie opady śniegu. Położenie wyżyny na drodze południowo-zachodniego monsunu modyfikuje przestrzenny rozkład opadów (ryc. 3). Centralna i wschodnia część płaskowyżu w Khasi i Jaintia Hills, gdzie krawędź wyżyny jest podniesiona najwyżej do 1200–1400 m n.p.m., otrzymuje ekstremalnie wysokie opady, sięgające średnio 10 000–12 000 mm rocznie w Cherrapunji i Mawsynram. Na okres monsunowy (czerwiec–wrzesień) przypada 70% rocznych opadów.

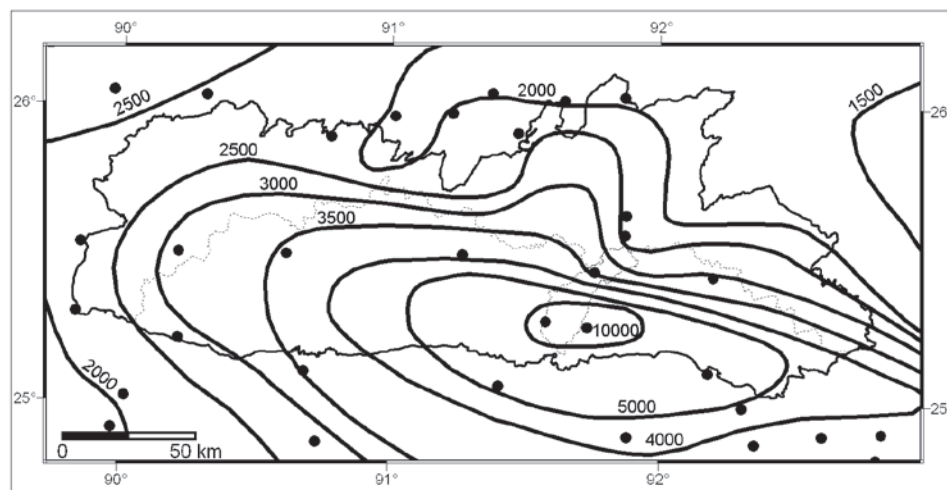
Sezonowość klimatu monsunowego wpływa na reżim hydrologiczny Umiew. Podobnie jak wszystkie rzeki wyżyny, Umiew ma deszczowo-gruntowe zasilanie, z wyraźnym maksimum i dużymi wahaniami przepływów w sezonie letnim – od czerwca do września. Na podstawie osadów złożonych na brzegu u ujścia Umiew w profilu Shella można określić zakres wahań stanów wody na 6 m, przy szerokości koryta ok. 180 m. Wskazuje to na maksymalne przepływy rzędu 2000–3000 m³ s⁻¹, szacowane wzorem Chezy-Manninga. W sezonie zimowym niewielkie opady powodują, że przepływy u ujścia Umiew nie przekraczają 10 m³ s⁻¹.

Gleby południowego skłonu Wyżyny Meghalaya należą do trzech grup: czerwono-żółtych zbielicowanych i czerwono-brunatnych lateyrowych, szarobrunatnych zbielicowanych oraz brunatnych kwaśnych (Agriculture and Soil..., 1987). 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. W centralnej części wyżyny, stare skały prekambryjskie okryte są pokrywami zwietrzelinowymi o miąższości kilkunastu metrów. Jednak działalność człowieka spowodowała, że w wielu miejscach profile glebowe zostały ogłowione aż do cokołu skalnego. Gleby bliżej krawędzi płaskowyżu, rozwinięte na skałach osadowych, są słabiej wykształcone, miejscami szkieletowe. W kanionach rozcinających płaskowyż pionowe ściany skalne są źródłem dostawy materiału z odpadania dla płytkich gleb, okrywających niżej stoki usypiskowe, porośnięte lasem.

Mały maszyn Wyżyny Meghalaya powoduje, że pomimo dużego zróżnicowania warunków termicznych z wysokością, wyżyna nie ma wyraźnie wykształconych pięter roślinnych (ryc. 4). Lasy stanowią główną formę pokrycia terenu na Wyżynie Meghalaya. Jedynie tropikalne i subtropikalne wiecznie zielone lasy liściaste są lasami klimaksowymi. Lasy sosnowe, zbiorowiska bambusa i traw, stanowią roślinność wtórną, rozwiniętą na obszarze kiedyś porośniętym subtropikalnym, wiecznie zielonym lasem liściastym (Ramakrishnan, Kushwaha, 2001).

Obszar ujściowy Umiew porastają lasy tropikalne zrzucające liście, które stopniowo przechodzą powyżej 300–400 m n.p.m., w las subtropikalny, wiecznie zielony. Na skłonie eksponowanym na południe, lasy liściaste sięgają wysokości ok. 1000 m n.p.m., a w głębokim kanionie ok. 1600 m n.p.m. Od wysokości 1000 m n.p.m. znacząco wzrasta powierzchnia zbiorowisk trawiastych



Ryc. 3. Rozkład średnich wieloletnich sum opadu na Wyżynie Meghalaya (wartości izohiet w mm). Linia przerywana zaznaczono granice (dział wodny) południowego skłonu wyżyny wraz ze zlewnią Umiew, punkty wskazują stacje opadów.

Fig. 3. Multiannual average rainfall distribution in the Meghalaya Plateau (isohyets in mm). Dotted line indicates boundaries (water divide) of the southern slope of the Meghalaya Plateau and the Umiew catchment, points indicate rainfall stations.

i rzadko rozrzuconych lasów sosnowych z dominującym gatunkiem *Pinus kesiya*, porastających zachowane resztki płątów wyżynnych w okolicach Cherrapunji i Mawsynram oraz centralną część płaskowyżu. W obrębie zbiorowisk traw, zachowały się płąty klimaksowych, subtropikalnych wiecznie zielonych lasów liściaste

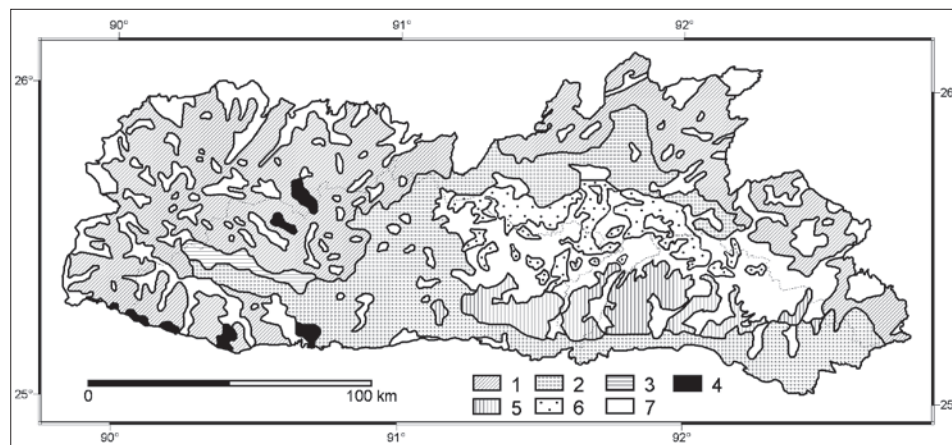
stych, które w przeszłości porastały cały płaskowyż wyżyny, będące przedmiotem kultu religijnego tzw. święte lasy (Bor, 1942).

Opisany krajobraz wskazuje na to, że człowiek dokonał istotnych zmian w środowisku przyrodniczym Wyżyny Meghalaya. Najstarsze ślady pobytu człowieka na wyżynie, który zajmował się łowiectwem i zbieractwem, datowane są na górny paleolit między 30 000 a 10 000 lat BP (Misra 2001). W neolicie na teren północno-wschodnich Indii napłynęła ludność Garo z obszaru Chin oraz ludność Khasi i Jaintia z Azji Południowo-Wschodniej wprowadzając uprawę roślin. Jednak dopiero rozwój technologii wytopu żelaza ok. 2000 lat BP, umożliwił produkcję narzędzi i szybszą ekspansję rolnictwa poprzez karczunek lasu (Gadgil i in., 1997). We wczesnym średniowieczu (ok. V wieku n.e.), rolnictwo żarowe było już powszechną formą użytkowania ziemi na wyżynie. Pierwsze opisy przyrodników pochodzące z bezpośrednich obserwacji z początku XIX wieku wskazują, że płaskowyż powyżej 1000 m n.p.m. był już wylesiony (Walters, 1832; Pemberton, 1835). Porastały go zbiorowiska traw z rzadko rozrzuconymi płatami lasu sosnowego. Strome zbocza kanionów na południowym skłonie zajmował subtropikalny, wiecznie zielony las liściasty. Krajobraz ten nie zmienił się znacząco do dziś. Zbiorowiska traw są więc bardzo stabilne w czasie, mimo że obszar wyżyny ma sprzyjające warunki termiczno-wilgotnościowe dla rozwoju lasu. Świadczą o tym zachowane płyty subtropikalnego lasu liściastego (święte lasy).

Procesy grawitacyjne na stokach w zlewni Umiew

Charakter procesów grawitacyjnych zależy w największym stopniu od nachylenia stoku, a także cech podłoża (litologii, porowatości i nasiąkliwości pokrywy zwietrzelinowej), klimatu – zwłaszcza opadu oraz pokrywy roślinnej. Nachylenia stoków w zlewni Umiew obejmują zakres od 0–90°. Przedziały nachyleń określają w przybliżeniu typ i natężenie procesów grawitacyjnych (IGU Commission..., 1968, ryc. 5, tab. 2).

Wietrzenie fizyczne odgrywa istotną rolę na ścianach i stokach skalnych o nachyleniach powyżej 55°. Odpadanie zachodzi głównie w środkowej i południowej części kanionu, w obrębie krawędzi zachowanych struktu-

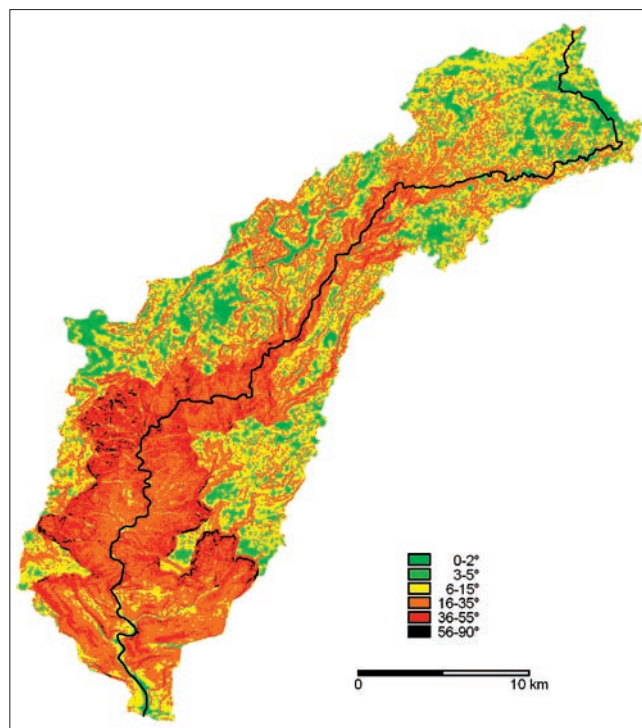


Ryc. 4. Formacje roślinne na Wyżynie Meghalaya (wg Ramakrishnan, Kushwaha 2001, uproszczone).

1 – las tropikalny wilgotny liściasty, 2 – las tropikalny zrzucający liście, 3 – las tropikalny wiecznie zielony liściasty, 4 – las tropikalny wilgotny liściasty z dominującym gatunkiem drzewa sal (*Shorea robusta*), 5 – las subtropikalny wiecznie zielony liściasty, 6 – las sosnowy, 7 – zbiorowiska traw i rolnictwo.

Fig. 4. Vegetation communities of the Meghalaya Plateau (after Ramakrishnan, Kushwaha 2001, simplified)

1 – tropical moist deciduous forest, 2 – tropical semievergreen forest, 3 – tropical evergreen forest, 4 – tropical moist deciduous forest with dominate species of sal tree (*Shorea robusta*), 5 – subtropical evergreen forest, 6 – pine forest, 7 – grass communities and agriculture.



Ryc. 5. Nachylenia stoków w zlewni Umiew

Fig. 5. Slope steepness in the Umiew catchment

ralnych platform, na których leżą Cherrapunji i Maw-synram. Dominuje tu cofanie ścian, zbudowanych z odpornych piaskowców żelazistych i glaukonitowych. Zwłaszcza w okresie zimowym ściany skalne o ekspozycji południowej w strefie 1200–1600 m n.p.m. poddawane są silnej insolacji oraz spadkom temperatury

Tabela 2. Nachylenia stoków w zlewni Umiew i związane z nimi procesy grawitacyjne

Slope steepness in the Umiew catchment and connected with them mass movements

Nachylenie stoku <i>Slope steepness</i>	Powierzchnia <i>Area (%)</i>	Procesy grawitacyjne <i>Mass movements</i>
0–2° – słabo nachylony <i>slightly sloping</i>	7,0	brak procesów grawitacyjnych <i>no mass movements</i>
3–5° – łagodny <i>gentle</i>	13,2	słabe spływanie <i>limited creep</i>
6–15° – silnie nachylony <i>strongly inclined</i>	26,8	silne spływanie, sływanie, osuwanie <i>intense creep, flow, slide</i>
16–35° – stromy <i>steep</i>	36,1	spływanie, sływanie, osuwanie <i>creep, flow, slide</i>
36–55° – bardzo stromy <i>very steep</i>	16,3	sływanie, osuwanie, odpadanie <i>flow, slide, rock fall</i>
56–90° – urwisty <i>scarp</i>	0,7	odpadanie, obrywanie <i>rock fall</i>

poniżej zera. Wychodnie kwarcytów i granitów są ekspozowane w mniejszym stopniu i wietrzenie fizyczne odbywa się głównie wzdłuż systemu żlebow. Odpadające bloki skalne w czasie staczania się niszczą szatę roślinną, a po ustabilizowaniu się przeciwdziałają erozji, hamując transport zwietrzliny w dół stoku.

Ruchy masowe w obrębie stoków o nachyleniach od 2° do 55° obejmują spływanie, osiadanie, sływanie i osuwanie. Spływowi sprzyjają w dorzeczu Umiew zmiany objętości pokrywy zwietrzelinowej w wyniku nasiąkania i wysychania. Podlegają mu na falistym płaskowyżu bloki piaskowców i wapieni, leżące na podścielających je łupkach, które w czasie wysokich opadów ulegają uplastycznieniu (Starkel, 1996). Obecność naprzemianległych warstw piaskowca o różnej odporności prowadzi lokalnie do osiadania wskutek sufozji. Choć spływanie może obejmować duże powierzchnie stoków już o nachyleniach 3° i w dłuższym czasie, wraz z osiadaniami, ma znaczenie rzeźbotwórcze, to jednak procesy te nie odgrywają większej roli z punktu widzenia degradacji środowiska przyrodniczego zlewni Umiew.

Znacznie większe zmiany w środowisku wilgotnych obszarów tropikalnych wywołują osuwiska oraz sływy błotne i gruzowe. Rozwój osuwisk i sływów jest związany z warunkami klimatycznymi – opadem o dużym natężeniu lub dużej wysokości rozłożonym w czasie oraz procesami morfogenetycznymi – podcinania lub rozcinania zboczy.

Wysokie opady wywołujące osuwiska i sływy

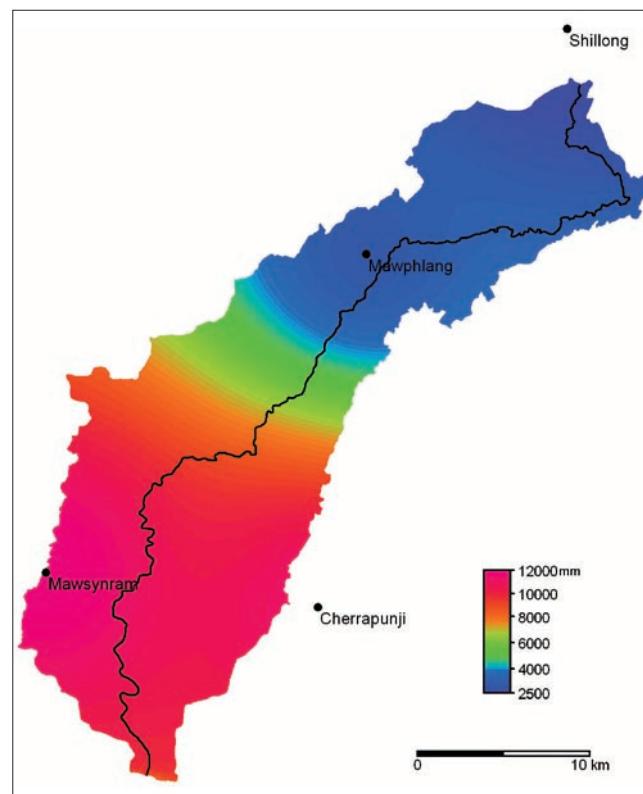
Cechą charakterystyczną południowego skłonu Wyżyny Meghalaya wraz ze zlewnią Umiew, jest równo-

czesne występowanie opadów rozlewnych i krótkotrwałych ulew, które uruchamiają osuwiska i sływy.

Opady rozlewnie zwykle trwają 3–4 dni, ale czasem zdarzają się ulewy 6–7 dniowe. Obejmują one duże obszary o powierzchni setek do tysięcy kilometrów kwadratowych. Przyczyną ulew o dużym natężeniu są cyklony tropikalne, szczególnie aktywne od marca do maja. Dodatkowo sprzyja im niemal pionowa ściana południowego skłonu wyżyny, ułatwiająca kondensację wilgotnych mas powietrza u czoła wysuniętych platform, gdzie na wysokości ok. 1300–1400 m n.p.m. położone są Cherrapunji i Mawsynram (Starkel, 1972; Soja, Singh, 2004). Krótkotrwałe ulewy konwekcyjne, trwające najczęściej do kilku godzin, obejmują niewielkie obszary o powierzchni do kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych.

Rozkład przestrzenny opadu interpolowany w oparciu o dane z tabeli 1 wskazuje, że południowa część zlewni leży w strefie bardzo wysokich opadów, od prawie 7000 mm u ujścia do 12000 mm na wysokości 1300–1400 m n.p.m. (ryc. 6). W tej części zlewni Umiew występuje silny gradient pionowy i opad wzrasta ok. 500 mm na 100 m wysokości. Wraz z oddalaniem się od krawędzi wyżyny wielkość opadu szybko maleje, osiągając 3500 mm na stacji Mawphlang i tylko 2200 mm w Shillongu, leżącym już w cieniu opadowym.

Prawie 80% powierzchni zlewni Umiew ma nachylenie stoków sprzyjające rozwojowi osuwisk i sływów. Duże zachmurzenie uniemożliwia wykorzystanie tech-



Ryc. 6. Przestrzenny rozkład sum średniego wieloletniego opadu w zlewni Umiew za okres 1901–2000

Fig. 6. Spatial distribution of average annual rainfall totals in the Umiew catchment for the period 1901–2000

nik teledetekcyjnych w sezonie monsunowym, kiedy są uruchamiane osuwiska. Również rozdzielczość czasowa wykonywania zdjęć satelitarnych jest zbyt mała, biorąc pod uwagę niemal codzienne wysokie opady, z których prawie każdy może uruchomić spływ lub osunięcie gleby. Jediną możliwą analizą jest wykorzystanie nielicznych danych historycznych oraz próba oszacowania skutków wysokich opadów po sezonie monsunowym.

Pierwszą informację o osuwiskach znajdujemy w pracy T. Oldhama (1854), który opisał skutki olbrzymiego spływu gruzowo-błotnego z 14 czerwca 1851 roku, obejmującego obszar kanionu od Mawphlang do ujścia Umiew. Wskutek opadów uruchomiony został, przepojony wodą, materiał na stokach, który po dotarciu do łożyska głównej rzeki tworzył lokalne zapory, piętrząc wodę do wysokości co najmniej 15 m. Płynąca głównym korytem spiętrzona masa podcinała brzegi, podierała wodę na dopływach, uruchamiając kolejne osuwiska. Na podstawie opisu T. Oldhama można szacować, że cały spływ na długości ok. 45 km trwał 2–3 godzin i zniszczył połowę liczącej ok. 4000 mieszkańców wsi Shella u ujścia Umiew.

Kolejne lata z licznymi osuwiskami na ogół korelują się z wysokimi opadami rocznymi, nie można jednak na tej podstawie przeprowadzić ilościowej analizy, ponieważ znaczny obszar zlewni jest słabo zaludniony i dane o procesach grawitacyjnych są niepełne.

Dodatkowych obiektywnych informacji może dostarczyć analiza zdjęć satelitarnych. Aby osuwiska mogły być zidentyfikowane na zdjęciu satelitarnym, muszą zajmować relatywnie duże powierzchnie, przekraczające wielkość piksela. Takie osuwiska tworzą się, kiedy wysoki lub intensywny opad znacznie przewyższa wartości przeciętne.

Przykładem może być 1988 roku, kiedy opad roczny w Cherrapunji wyniósł 17 925 mm i przekroczył średnią wieloletnią o 63%. Na stacji w Shillongu zanotowano 3807 mm, najwyższą sumę roczną opadu za cały okres pomiarowy 1867–2000. Wystąpiły dwa ciągi 4-dniowych opadów rozlewnych 4–7.07., z sumami 1989 mm w Cherrapunji i 522 mm w Shillongu oraz 24–27.08., z sumami 2338 mm w Cherrapunji i 441 mm w Shillongu.

Do wizualnej analizy skutków opadu wykorzystano barwne kompozycje FCC satelity Landsat TM z 1987, 1988 i 1991 roku. Osuwiska o powierzchni kilkudziesięciu hektarów powstały w centralnej części zlewni Umiew, na wysokości 1000–1500 m n.p.m. i stokach o nachyleniu 30–40° (ryc. 7). Największe osuwiska wystąpiły na podciętych przez cieki zboczach. Sekwencja zdjęć pokazuje stan środkowej części zlewni w 1987 roku, kiedy opady były zbliżone do średniej wieloletniej, w 1988 roku, kiedy wystąpiły ekstremalne opady i w 1991 roku. Na zdjęciu z 1988 roku (ryc. 7) widać wyraźnie świeże osuwiska (1) oraz koryto Umiew, wypełnione materiałem dostarczanym ze stoków (2) aż do ujścia, czyli na długości ok. 50 km. Zalesione, strome stoki, na których powstały płytkie osuwiska, były głównym źródłem dostawy materiału do koryta rzeki. W czasie sezonu monsunowego był on

wynoszony i deponowany w odległości do 10 km od podnóży wyżyny na Nizinie Bengalskiej (ryc. 7, (3)). Rozlewne opady sięgające 20–25% sumy rocznej w ciągu 3–4 dni są rzadkie i występują w zlewni Umiew raz na kilkadziesiąt lat (Prokop, 2005).

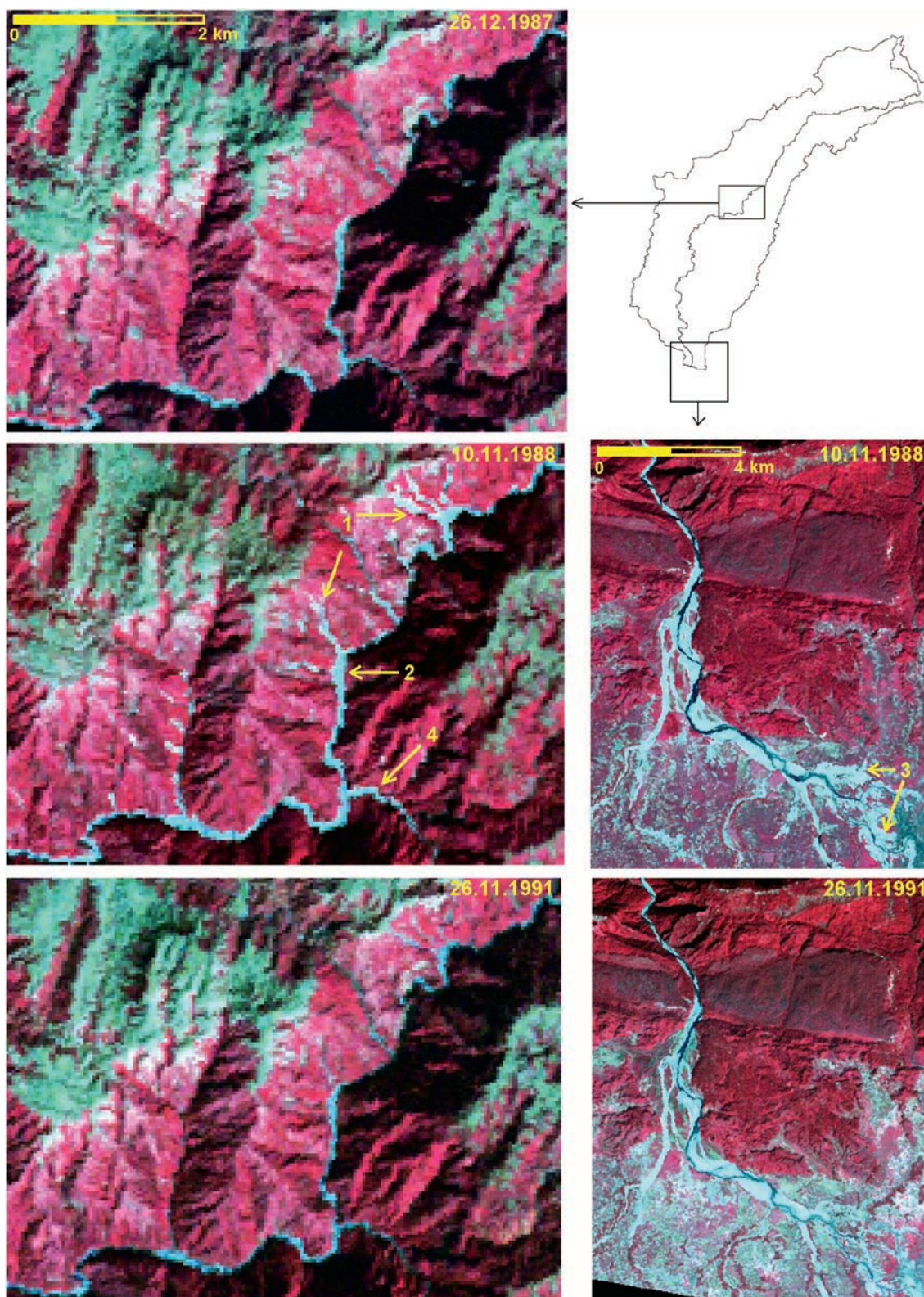
Na zdjęciu z 1991 roku wykonanym po sezonie monsunowym, nie widać już osuwisk. System ulega więc stabilizacji w ciągu 2–3 lat, jeżeli opady wahają się w tych latach w pobliżu średniej, czyli tak jak było to w latach 1989–1991. Osuwiska zarastają, początkowo zbiorowiskami traw, zatrzymując dostawę materiału do koryt cieków. Większość materiału drobnego jest w tym czasie usuwana niemal całkowicie z koryta rzeczno, czemu sprzyjają częste wezbrania.

Rozdzielczość przestrzenna zdjęcia satelitarnego 28,5 x 28,5 m jest zbyt mała, aby zidentyfikować wszystkie osuwiska. Na zdjęciach satelitarnych obszarów zalesionych widoczne są głównie duże nisze i rynny pozbawione roślinności. Brak śladów mniejszych osuwisk nie jest dowodem na to, że nie ma przemieszczeń grawitacyjnych na stokach. W gęstym tropikalnym lesie korony wyższych drzew zasłaniają grunt, a na terenach użytkowanych rolniczo gleba, po okresie zbiorów, słabo kontrastuje z odsłoniętym podłożem osuwiska. Jedynym wskaźnikiem działalności procesów grawitacyjnych pozostaje wówczas wypełnienie szerokiego koryta cieku materiałem dostarczanym z osuwisk (ryc. 7, (4)).

Wysoki opad roczny w Cherrapunji nie jest jednak wskaźnikiem wystąpienia dużych osuwisk w zlewni Umiew. Przykładem może być 1998 rok, kiedy zanotowano największe powódzie w historii Bangladeszu. Wprawdzie w Cherrapunji opad roczny był wyższy o 30% od średniej wieloletniej, ale już w Shillongu spadło o 11% deszczu mniej od średniej z wielolecia. Nie zaobserwowano jednak większych osuwisk na zdjęciu satelitarnym IRS-1D o rozdzielczości przestrzennej 23,5 x 23,5 m z listopada 1998 roku.

Dodatkowa wizualna analiza 10 zdjęć satelitarnych z lat 1975–2002 zlewni Umiew wykonanych przez satelity Landsat i IRS wykazała, że świeże osuwiska i spływy oraz ślady po starszych widoczne w terenie nie odwzorowują się na zdjęciach. Wynika z tego, że zbocza kanionu Umiew w latach z opadem w pobliżu średniej wieloletniej, są modelowane przez płytkie osuwiska i niewielkie spływy gruzowo-błotne.

Założenie to potwierdza zaobserwowany w Cherrapunji podczas badań terenowych w dniach 12–13.11.2002 roku opad o wysokości 270 mm, połączony z licznymi osuwiskami i spływami ziemnymi o niewielkich rozmiarach (od kilkudziesięciu do kilkuset metrów kwadratowych powierzchni). Średnia intensywność opadu wyniosła 5,6 mm · h⁻¹ z maksimum sięgającym 20 mm · h⁻¹. Obserwowane osuwiska w okolicach Cherrapunji były ograniczone do bardzo stromych stoków kanionu o nachyleniach powyżej 35°, porośniętych naturalnym lasem. Płytkie osuwiska powstały również w północnej części zlewni w rejonie Mawphlang, na stokach o nachyleniach powyżej 15°, zajętych pod uprawę oraz w podcięciach dróg.



Ryc. 7. Zdjęcia satelitarne Landsat TM części dorzecza Umiew. Zdjęcie z 1987 roku przedstawia stan przed uruchomieniem osuwisk, z 1988 roku po powstaniu osuwisk i z 1991 roku trzy lata po wystąpieniu ruchów masowych. 1 – świeże osuwiska, 2 – koryto wypełnione materiałem ze stoków, 3 – depozycja osadu u podnóża wyżyny na Nizinie Bengalskiej, 4 – koryto wypełnione materiałem ze stoków w zlewni gdzie nie są widoczne osuwiska na zdjęciu satelitarnym.

Fig. 7. The Landsat TM images of the part of the Umiew catchment. Image from 1987 shows the situation before landslide triggering, one from 1988 after landslides and one from 1991 – three years after mass movements. 1 – active landslides, 2 – aggraded river bed with material from slopes, 3 – sediment deposition at the foothills on the Bengal Plain, 4 – river bed filled with material from slopes in the catchment where landslides are not visible on the satellite image

W Cherrapunji każdego roku osiągany jest opad rzędu 250–300 mm w ciągu dwóch dni. Dlatego też okres powtarzalności płytkich osuwisk i spływów w zlewni Umiew można określić na mniej niż 1 rok.

Najbardziej podatne na osuwiska są strome zbocza kanionu w środkowej części dorzecza Umiew, w zasięgu ekstremalnych opadów, gdzie gęstość sieci rzecznej przekracza $10 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$. Jest to jeden z najsłabiej zaludnionych obszarów zlewni i występujące tu osuwiska są wynikiem jedynie oddziaływania czynników naturalnych.

Na pagórkowatym płaskowyżu o dojrzałej rzeźbie ruchy osuwiskowe rozwijają się głównie w północnej części zlewni o grubszych pokrywach zwietrzelinowych, wykorzystywanych pod uprawę. Rozwojowi osuwisk dodatkowo sprzyja gęstsza sieć dróg (średnio $2\text{--}3 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$) podcinających stoki i odkrywkowe wyrobiska surowców skalnych o stromych ścianach. Nie widać natomiast skutków ekstremalnych opadów na pagórkowatym płaskowyżu o zdegradowanych glebach w rejonie Cherrapunji i Mawsynram. Obszar ten, którego gleba chroniona jest przez grubą warstwę kamiennego bruku należy w całej zlewni do najbardziej odpornych na ruchy osuwiskowe.

Zmiany powierzchni leśnej i zaludnienia

Wszyscy badacze podkreślają ciągły spadek powierzchni leśnej na Wyżynie Meghalaya (ryc. 8). Obliczane tempo wylesiania wykazuje jednak duże różnice. Rozbieżności wynikają głównie z trudności szacunku powierzchni leśnych górskich obszarów tropikalnych. W przypadku Meghalaya należą do nich: różnorodność formacji roślinnych, dających zbliżone odbicie spektralne, mozaikowość form użytkowania ziemi i ich duża zmienność czasowo-przestrzenna, ograniczone możliwości wykonania zdjęć w warunkach bez zachmurzenia oraz efekt zacienienia w głębokich kanionach.

Pierwsze i zarazem najbardziej skrajne wyniki interpretacji zdjęć satelity Landsat MSS (Department of Space..., 1983) poddano krytyce i uznano za niezbyt wiarygodne ze względu na brak doświadczenia osób analizujących zdjęcia (FSI, 1989).

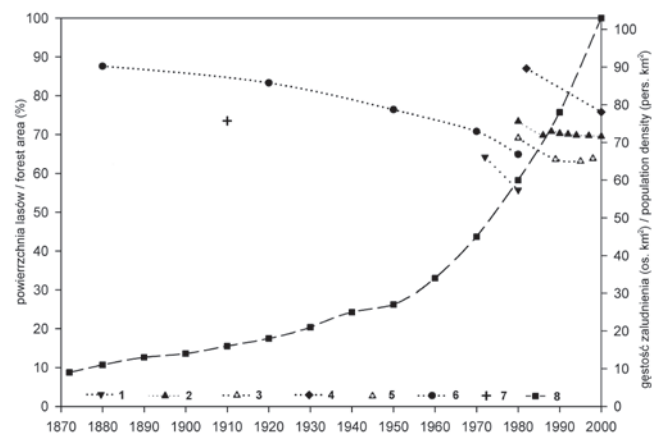
Począwszy od 1987 roku powierzchnia lasów w Indiach jest obliczana przez Indyjską Służbę Leśną (FSI – Forest Survey of India) co dwa lata, w oparciu o monitoring satelitarny, zgodnie z definicją FAO (1993): las to zbiorowisko drzew o powierzchni koron powyżej 10%, porastających obszar większy niż 0,5 ha. W rzeczywistości FSI zalicza do lasu tylko powierzchnie większe niż 1 ha wraz z plantacjami drzew i obszarami upraw agroleśnych. Zgodnie z tą definicją powierzchnia lasów w Meghalaya w 2000 roku wynosiła 69,5% powierzchni stanu (FSI, 2001). Rząd stanu Meghalaya w oparciu o dane statystyczne na poziomie wsi definiuje las jako obszar, z którego płacony jest podatek leśny lub teren uznany za las specjalnym aktem prawnym, np. w przypadku obszarów chronionych. Pola uprawne oraz pa-

stwiska w obrębie lasu są zaliczane do powierzchni leśnej. Zgodnie z tą definicją powierzchnia lasu w Meghalaya w 2000 roku wyniosła tylko 42,3% powierzchni stanu (FSI, 2001).

Najnowsze opracowanie, wykorzystujące klasyfikację hybrydową zdjęcia satelity IRS-1C WiFS z 1998 roku w rozdzielczości przestrzennej $188 \times 188 \text{ m}$, oszacowuje powierzchnię lasów w Meghalaya na 63,8% (Roy, Joshi, 2002). Odejmując od niej obliczone przez tych samych autorów powierzchnie form użytkowania zaliczane do obszarów leśnych, a niebędące formalnie lasem – zbiorowiska bambusowe i pola odlogowane, na które dopiero wkracza wtórny las, powierzchnia leśna wyniosła 43,2%. Wynik jest więc zbliżony do powierzchni obliczanej w oparciu o statystyki na poziomie wsi przez rząd stanu Meghalaya.

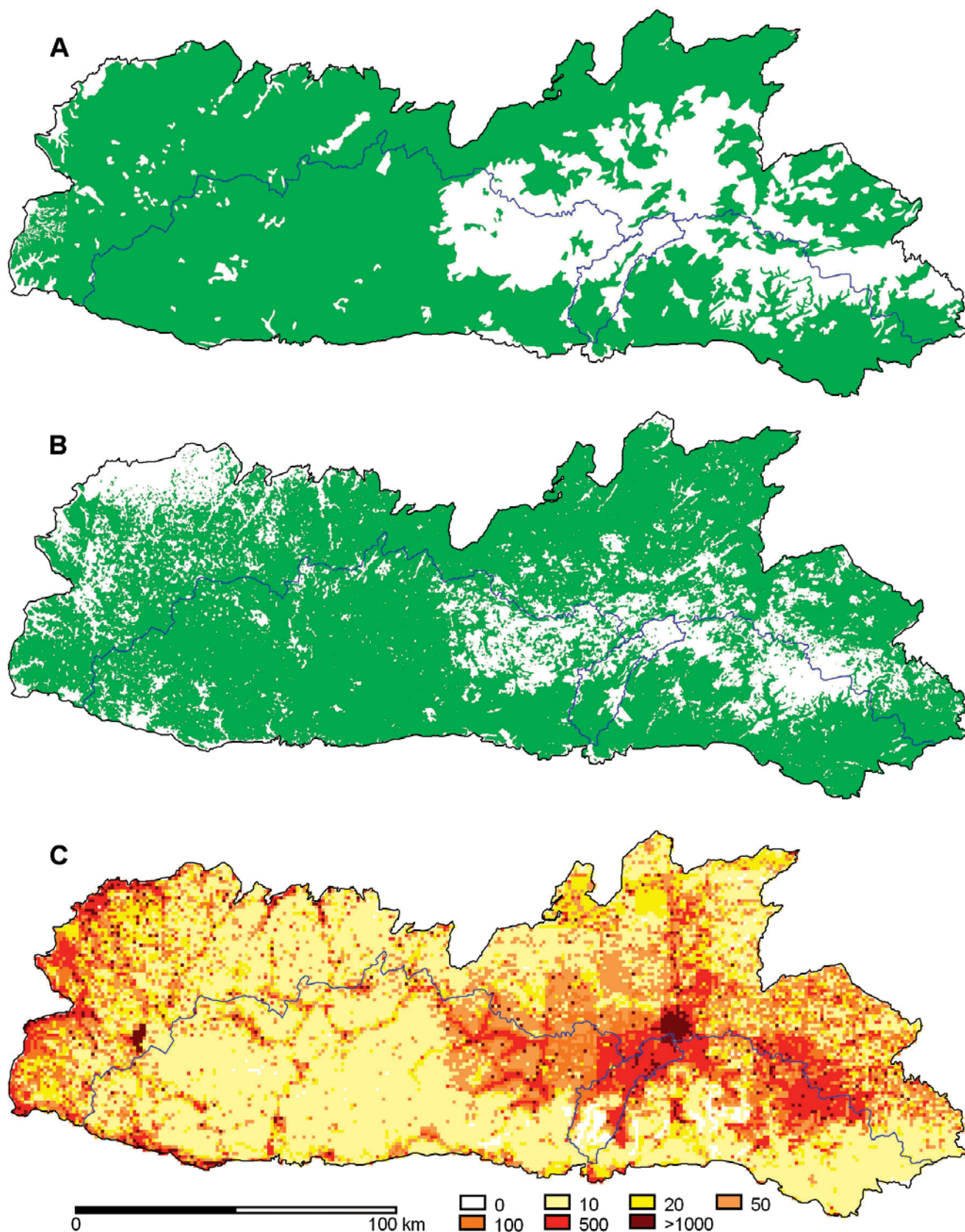
Jedynym opracowaniem na podstawie historycznych danych statystycznych z Assamu, w skład którego do 1972 roku wchodziła Wyżyna Meghalaya, jest baza danych zmian użytkowania ziemi w latach 1880–1980 w Azji Południowej i Południowo-Wschodniej (Richards, Flint, 1994, ryc. 8). Jednak dane o użytkowaniu ziemi, zwłaszcza w niedostępnym Garo Hills w XIX wieku, były jedynie szacunkowe i obciążone znacznymi błędami.

Dane demograficzne są dokładniejsze, ponieważ obszar wyżyny nie podlegał w ostatnich 150 latach istotnym zmianom granic ani większym migracjom. Pierwszy spis z 1872 roku w Garo Hills, wykazał gęstość zaludnienia poniżej $12 \text{ os.} \cdot \text{km}^{-2}$, a w Khasi i Jaintia Hills $9 \text{ os.} \cdot \text{km}^{-2}$ (Census of India, 1872–2001). Na po-



Ryc. 8. Zmiany powierzchni lasów (1880–2000) i gęstości zaludnienia (1872–2000) na Wyżynie Meghalaya według obliczeń różnych autorów. Powierzchnia lasów: 1 – Department of Space (1983), 2 – FSI (2001), 3 – Roy, Tomar (2001), 4 – Ramakrishnan, Kushwaha (2001), 5 – Roy, Joshi (2002), 6 – Richards, Flint (1994), 7 – opracowano na podstawie mapy 1:253 440 z 1911 roku; gęstość zaludnienia: 8 – Census of India (1872–2001).

Fig. 8. Changes of the forest area (1880–2000) and population density (1872–2000) in the Meghalaya Plateau according to various authors. Forest area: Department of Space (1983), 2 – FSI (2001), 3 – Roy, Tomar (2001), 4 – Ramakrishnan, Kushwaha (2001), 5 – Roy, Joshi (2002), 6 – Richards, Flint (1994), 7 – author, on the basis of the map of scale 1:253 440 from 1911 r.; population density: 8 – Census of India (1872–2001).



Ryc. 9. Rozmieszczenie lasów i gęstości zaludnienia na Wyzynie Meghalaya

A – rozmieszczenie lasów w 1911 roku (mapa w skali 1:253 440), B – rozmieszczenie lasów w 2000 roku (wskaźnik roślinności NDVI na podstawie zdjęć satelitarnych Landsat ETM+), C – gęstość zaludnienia (baza danych LandScan w wersji z 2002 roku).

Fig. 9. The spatial distribution of forest and population density in the Meghalaya Plateau

A – the distribution of forest in 1911 (map at scale of 1:253 440), B – the distribution of forest in 2000 (NDVI vegetation index on the basis of Landsat ETM+ images), C – the population density (Land Scan database version for 2002).

czątku XX wieku dynamika wzrostu ludności w Meghalaya była zbliżona do średniej w Indiach. Gwałtowny przyrost nastąpił dopiero w latach 1951–1961, a od 1971 roku wynosi średnio 3,1% rocznie wobec 2,1–2,5% w Indiach.

Żadna z przedstawionych ocen nie wykorzystywała materiałów kartograficznych sprzed lat 70. XX wieku. Dlatego zdigitalizowano lasy na mapach topograficznych w skali 1:253 440 z 1911 roku, obliczając ich powierzchnię dla stanu Meghalaya oraz trzech jednostek administracyjnych – Garo, Khasi i Jaintia Hills (ryc. 9A, tab. 3). Do porównania dynamiki zmian powierzchni leśnej wykorzystano dane tabelaryczne FSI (2001), obliczone w oparciu o zdjęcie satelitarne w skali 1:250 000 z 2000 roku. Dane FSI nie uwzględniały jednostki fizycznogeograficznej, jaką jest południowy skłon wyżyny. Dlatego przygotowano mapę zalesienia całego stanu dla roku 2000, z wydzieleniem południowego skłonu, w oparciu o zdjęcia satelity Landsat ETM+, wykorzystując znormalizowany wskaźnik roślinności (NDVI). Uzyskano powierzchnię lasów 69,8%, zbliżoną do obliczonej przez FSI (ryc. 9B). Uzupełnieniem jest mapa gęstości zaludnienia w stanie Meghalaya, przygotowana w oparciu o bazę danych o światowym zaludnieniu LandScan Global Population Database (ryc. 9C).

mniejszą gęstość zaludnienia niż północny. Powierzchnia leśna jest więc bardziej stabilna, a jej spadek o 1,4% w ciągu 90 lat mieści się w granicach błędu obliczeniowego. Zachodnia, najsłabiej rozwinięta gospodarczo część wyżyny – Garo Hills, zanotowała największy spadek powierzchni leśnej o 14,7%, ale tutaj też był jej najwyższy udział procentowy w 1911 roku. Jedyną przyczyną wylesiania w tym regionie był wzrost demograficzny i konieczność zaspokojenia potrzeb żywnościowych, poprzez karczowanie lasu dla potrzeb rolnictwa żarowego oraz pozyskania drewna opałowego. W tym samym okresie w Khasi Hills nastąpił wzrost powierzchni leśnej o 5,4%, mimo podobnego jak w Garo Hills wzrostu gęstości zaludnienia. W Jaintia Hills, które miało najniższy odsetek lasów w 1911 roku, spadek powierzchni leśnej jest o połowę mniejszy w porównaniu z Garo Hills, przy zbliżonym procentowo wzroście gęstości zaludnienia.

Systemy uprawy roślin

Ponad 80% ludności Wyżyny Meghalaya żyje na wsi, a 65% jej mieszkańców utrzymuje się z rolnictwa (Census of India, 1872–2001). Duże przekształcenia środo-

Tabela 3. Zmiany powierzchni lasów i gęstości zaludnienia w Meghalaya w latach 1911–2000/01

Changes of the forest area and population density in the Meghalaya for the years 1911–2000/01

Lata/Tendencja Years/Tendency	Meghalaya		Garo Hills		Khasi Hills		Jaintia Hills		Skłon południowy <i>Southern slope</i>	
	pow. lasu <i>forest area</i> (%)	gęstość zaludnienia <i>population density</i> (os · km ⁻²)	pow. lasu <i>forest area</i> (%)	gęstość zaludnienia <i>population density</i> (os · km ⁻²)	pow. lasu <i>forest area</i> (%)	gęstość zaludnienia <i>population density</i> (os · km ⁻²)	pow. lasu <i>forest area</i> (%)	gęstość zaludnienia <i>population density</i> (os · km ⁻²)	pow. lasu <i>forest area</i> (%)	gęstość zaludnienia <i>population density</i> (os · km ⁻²)
1911	73,6	16	92,7	19	64,3	19	58,1	11	74,1	–
2000/01	69,5	103	78,0	106	69,7	110	50,7	77	72,7	63
Wzrost/spadek Increase/decrease	-4,1	87	-14,7	87	5,4	91	-7,4	66	-1,4	–
Średnioroczny wzrost/spadek Annual average increase/decrease	-0,05	1,0	-0,16	1,0	0,06	1,0	-0,08	0,7	-0,02	–

Porównując mapy obszarów leśnych z 2000 roku i gęstości zaludnienia widać wyraźnie, że na wylesionym płaskowyżu w Khasi i Jaintia Hills gęstość zdecydowanie przekracza 100 os. · km⁻². Na większości obszaru zalesionego gęstość zaludnienia nie przekracza na ogół 10 os. · km⁻². Liczba ludności, zamieszkująca południowy skłon, wynosi ok. 700 000, co daje średnią gęstość zaludnienia 63 os. · km⁻², znacznie poniżej średniej dla całego stanu (103 os. · km⁻²).

Spadek powierzchni leśnej w Meghalaya w XX wieku jest niewielki, w porównaniu ze wzrostem gęstości zaludnienia (tab. 3). Niedostępny teren, brak większych miast oraz inwestycje ograniczone ze względów politycznych powodują, że skłon południowy ma zdecydowanie

wiska przyrodniczego, przy szybkim wzroście zaludnienia, związane są z rolniczą działalnością człowieka. Na Wyżynie Meghalaya funkcjonują równocześnie cztery systemy uprawy roślin. Każdy z nich w różnym stopniu oddziałuje na środowisko.

Rolnictwo żarowe

Najstarszym systemem upraw jest rolnictwo żarowe *jhum*, przetrwałe od neolitu, kiedy człowiek posiadał umiejętność wykorzystania ognia i przeszedł od łowiectwa i zbieractwa do uprawy zbóż. Uprawa w systemie żarowym polega na wycięciu lasu późną jesienią na powierzchni 2–3 ha i pozostawieniu na zimę ściętych

drzew do wyschnięcia. Wiosną sucha biomasa jest spalana, wzbogacając glebę w materię organiczną i składniki pokarmowe. Wraz z nadejściem pierwszych opadów wysiewa się zboża – głównie ryż, sady warzywa oraz drzewa owocowe. Zazwyczaj po dwóch latach pole jest opuszczane i stopniowo zarasta. W zależności od presji ludnościowej pole po kilku lub kilkudziesięciu latach ponownie zajmowane jest pod uprawę. Czas między kolejnymi uprawami, czyli okres odłogowania pola to tzw. cykl *jhum* (Tokyo, Ramakrishnan, 1983).

T.C. Whitmore (1991) na podstawie badań w Azji Południowo-Wschodniej twierdzi, że gospodarka żarowa zwykle jest w stanie zaspokoić potrzeby ludności, bez szkody dla środowiska, przy gęstości zaludnienia 10–20 os.·km⁻². Na Wyżynie Meghalaya utrzymanie 14% ludności tj. 257 140 osób, zależy od rolnictwa żarowego, na potrzeby którego co roku karczowane jest 432 km² lasu (Directorate of Economics..., 2001). Szacunkowo, na podstawie danych z jednostek administracyjnych można przyjąć, że na południowym skłonie wyżyny ok. 60 000 osób utrzymuje się z rolnictwa żarowego, wycinając każdego roku ok. 100 km² lasu. Nie jest to jednak nieodwracalny ubytek powierzchni leśnej. W tym samym czasie wyrasta las na polach pozostawionych odłogiem.

Wpływ rolnictwa żarowego na degradację lasu jest jednym z najtrudniejszych do oceny, zarówno tradycyj-

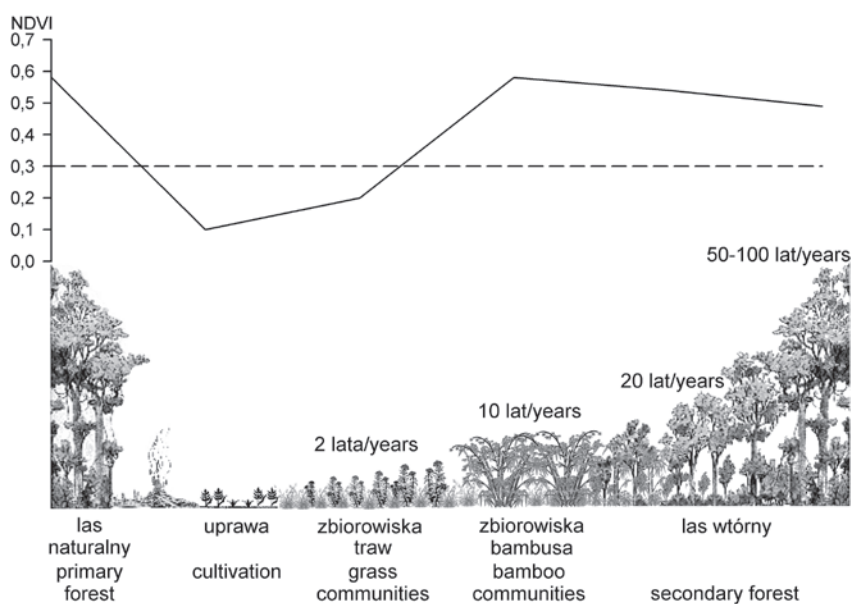
nymi jak i teledetekcyjnymi metodami. Ze względu na małą powierzchnię karczowanych pól i szybkie, powtarzane zarastanie rolnictwo żarowe nie jest wydzielane na mapach topograficznych jako oddzielna forma użytkowania ziemi, ale włączane do obszarów leśnych. Częsta rotacja pól powoduje, że na niewielkim obszarze zbiorowiska traw, bambusa i lasu równocześnie znajdują się w różnych stadiach wtórnej sukcesji, dając zbliżone odbicie spektralne (ryc. 10). W okresie suchym niektóre zbiorowiska lasów tropikalnych i bambusa zrzucają liście. Szczególnie wrażliwy na tego typu fenologiczną zmienność jest wskaźnik roślinności NDVI, najczęściej używany do szacunku powierzchni leśnych (Roy, Joshi, 2002). Jest to również jedna z głównych przyczyn tak dużych rozbieżności w ocenie powierzchni leśnych na Wyżynie Meghalaya.

Współcześnie przestrzenny zasięg rolnictwa żarowego możemy prześledzić w oparciu o dane z satelitów Terra i Aqua. Znając kolejność zabiegów agrotechnicznych w uprawie żarowej w Meghalaya, wykonano mapy pożarów od stycznia do maja dla lat 2003–2005 (ryc. 11A). Pewien wpływ na ilość rejestrowanych pożarów może mieć rozkład zachmurzenia w poszczególnych latach. Jednak między styczniem a marcem zazwyczaj nie przekracza ono 3 oktantów i rośnie dopiero w maju do 5 oktantów. Pożary zidentyfikowane w styczniu można potraktować jako tło antropogeniczne,

związane z pozarolniczą działalnością człowieka (ryc. 11B). Wyraźne ich maksimum przypada na marzec i pierwszą połowę kwietnia.

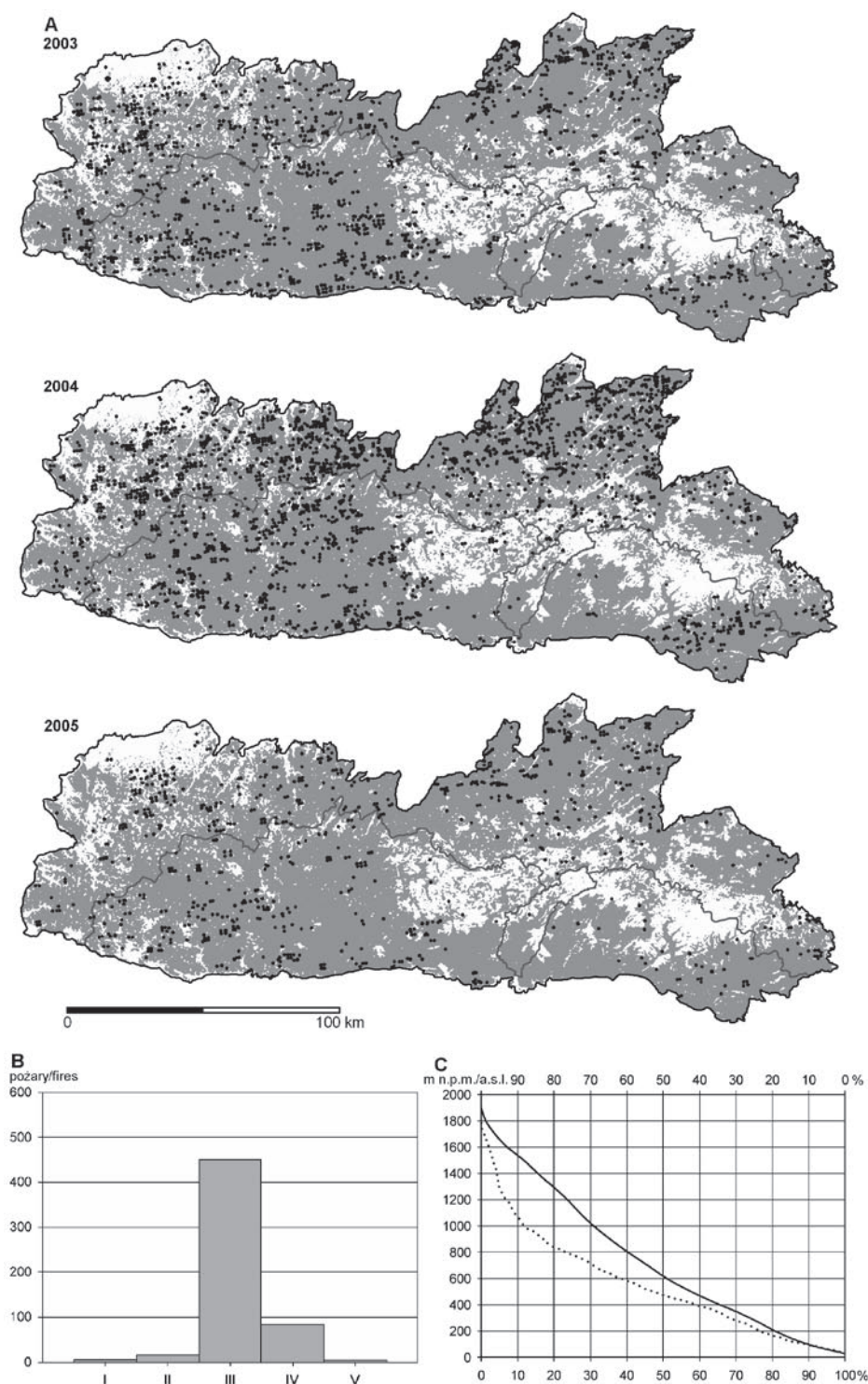
Wykonane mapy pokazują, że obszarami lasu najbardziej zagrożonymi karczowaniem na potrzeby gospodarki żarowej na południowym skłonie wyżyny są Garo Hills oraz wschodnia część Jaintia Hills. Natomiast wyraźnie mniejsza liczba pożarów jest notowana w strefie najwyższych opadów na południowym skłonie. Rozmieszczenia pożarów, skorelowane z numerycznym modelem wysokościowym SRTM wskazują, że nie ma różnic między rozkładem pożarów z wysokością między północnym a południowym skłonem wyżyny. Prawie 90% pożarów na południowym skłonie występuje do 1000 m n.p.m., chociaż 31% powierzchni obszaru leży powyżej tej wysokości (ryc. 11C).

Niemal zupełnie nie notuje się pożarów na wylesionym płaskowyżu. Tutaj też przebiega granica między klasycznym rolnictwem żarowym *jhum* a odmianą *bun* tego systemu. B.K. Mishra i P.S. Ramakrishnan (1983) uważają, że przyczyną wykształcenia systemu *bun* jest skrócony okres odłogowania pól do 2–3 lat,



Ryc. 10. Sukcesja roślinności w systemie uprawy *jhum* na Wyżynie Meghalaya oraz średnie wartości wskaźnika roślinności NDVI dla poszczególnych zbiorowisk roślinnych w sezonie zimowym (listopad–luty) na zdjęciu satelity IRS-1C WiFS. Wartość wskaźnika NDVI powyżej 0,3 (przerwana linia) teoretycznie wyznacza zbiorowiska lasów

Fig. 10. The succession of vegetation in the *jhum* cultivation system in the Meghalaya Plateau and average values of the NDVI vegetation index for particular vegetation communities during winter season (November–February) on the IRS-1C WiFS satellite image. The value of the NDVI index above 0.3 (dotted line) theoretically indicates forest communities. Opracowanie autora na podstawie (by the author on the basis of): Singh, Ramakrishnan 1982, Tokyo, Ramakrishnan 1983, Roy, Joshi 2002.



Ryc. 11. Pożary związane z rolnictwem żarowym *jhum* na Wyżynie Meghalaya zarejestrowane przez satelity Terra i Aqua między styczniem a majem w latach 2003–2005

A – przestrzenny rozkład pożarów na tle satelitarnej mapy lasów z 2000 roku (por. ryc. 10B), B – średnia liczba pożarów na południowym skłonie wyżyny, C – skumulowany rozkład pożarów z wysokością nad poziom morza (linia przerywana) na tle krzywej hipsograficznej (linia ciągła) na południowym skłonie wyżyny

Fig. 11. Fires connected with the *jhum* cultivation in the Meghalaya Plateau registered by Terra and Aqua satellites between January and May for the years 2003–2005

A – the spatial distribution of fires on the background of the satellite map of forest from 2000 (cf. Fig. 10B), B – the average number of fires on the southern slope of Meghalaya, C – cumulative distribution of fires with elevation above sea level (dotted line) on the background of hipsographic curve (continuous line) on the southern slope of the Meghalaya Plateau

związany z presją wzrastającej liczby ludności oraz brak lasu, czyli źródła odpowiednio dużej ilości biomasy do spalania. Do użyczenia gleby wykorzystywane są tylko dolne gałęzie sosny *Pinus kesiya*, które po wysuszeniu są spalane na polu pod kilkucentymetrową warstwą ziemi. Zazwyczaj możliwe są dwa zbiory roślin okopowych – ziemniaków i kapusty w ciągu roku. Po dwóch latach uprawy pole pozostawia się odlegiem do wzrostu naturalnej roślinności. Równocześnie okrywa z ziemi w systemie *bun*, pod którą spalana jest materia organiczna, stanowi wystarczający izolator, aby ogień nie mógł zostać wykryty przez satelitę.

Nie jest możliwe oszacowanie zmian powierzchni upraw w systemie *bun* w zlewni Umiew, ponieważ ta forma użytkowania nie była zaznaczona na najstarszych mapach. Natomiast dane statystyczne wskazują, że niemal w całości uprawa ziemniaka, skoncentrowana jest na płaskowyżu w Khasi i Jaintia Hills (por. ryc. 1). Powierzchnia jego uprawy zwiększyła się na tym terenie z 137 km² w 1876 roku (Hunter, 1879) do 208 km² w 2000 roku (Directorate of Economics..., 2001). Zwiększenie areалу upraw wymagało zajęcia coraz bardziej stromych stoków, wykorzystywanych dotąd jako pastwiska lub porośniętych lasem sosnowym. Uprawa na krótkich, ale stromych stokach powoduje, że system *bun* stwarza duże zagrożenie erozją sięgającą pod uprawami ziemniaka nawet do 170 t·ha⁻¹·rok⁻¹ (Singh i in., 1981; Mishra, Ramakrishnan, 1983).

Uprawa ryżu

Monokulturowa uprawa ryżu, nawadnianego w dnach dolin (*paddy*), również należy

do starych systemów upraw. Prawdopodobnie ludność przybyła z Azji Południowo-Wschodniej wprowadziła uprawę na wyżynę, wylesiając w pierwszej kolejności dna dolin. Uprawy ryżu skoncentrowane są w Meghalaya głównie u podnóża wyżyny w ciepłym i wilgotnym klimacie. Na obszarze płaskowyżu powyżej 1000 m n.p.m. pola ryżowe zajmują niewielki obszar ok. 250 km². Obszary zajęte pod uprawę ryżu zajmowały w 1910 roku 2,4% powierzchni zlewni Umiew i ich przestrzenne rozmieszczenie nie zmieniło się. System opiera się na naturalnym zasilaniu wodą ze strumieni w czasie wezbrań i nie jest szkodliwy dla środowiska.

Plantacje

Uprawy palmy areki wraz z pnączami pieprzu betelowego oraz sady pomarańczowe zajmują niewielkie obszary na południowym skłonie wyżyny w obrębie stromych zboczy kanionów. Zbocza na potrzeby plantacji wylesiono na długo przed przybyciem Brytyjczyków. Orzechy palmy areki wraz z liśćmi pieprzu betelowego miały zawsze zbyt, stanowiąc najpowszechniejszą używkę w północno-wschodnich Indiach. Dwie trzecie produkcji pomarańczy pochodziło z okolic Shella u ujścia Umiew (Oldham, 1854). Obliczenia na mapach zlewni Umiew w skali 1:63 360 z 1910 roku wykazały, że plantacje zajmowały 5,7 km², tj. 1,2% powierzchni zlewni. Część plantacji przetrwała do dziś i jest rozproszona w obrębie lasu tropikalnego. Rozdzielczość przestrzenna zdjęć satelity Landsat i IRS jest jednak zbyt mała, aby wydzielić je w oddzielną formę użytkowania. Ze wzglę-

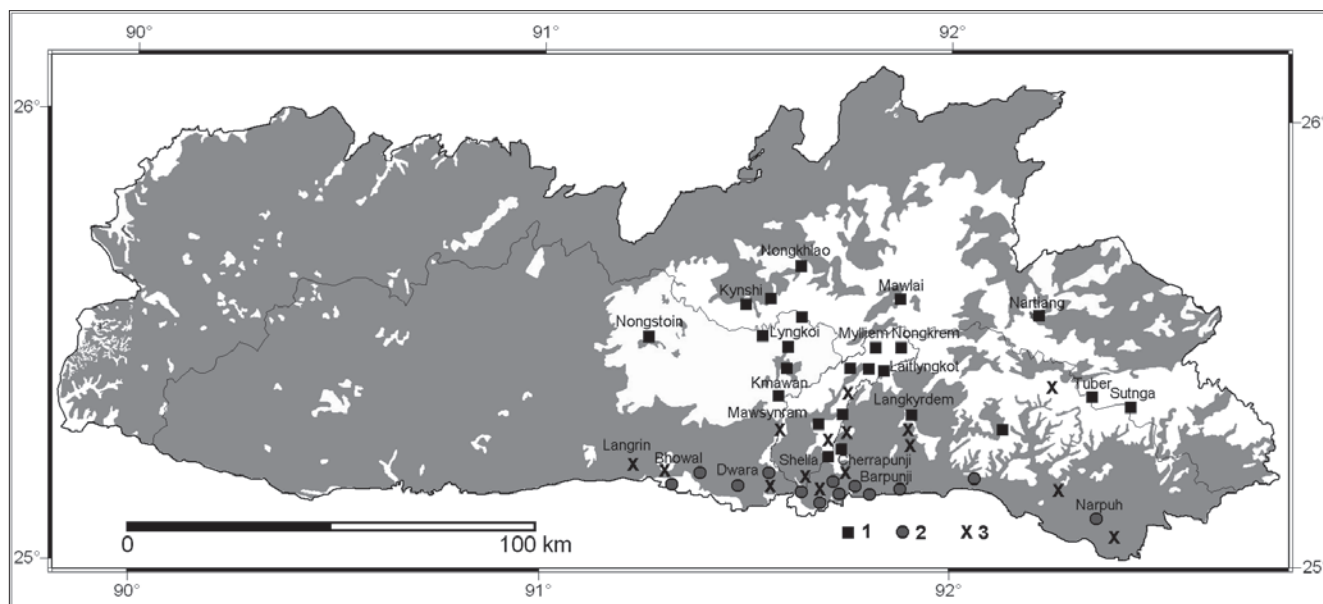
du na małe powierzchnie oddziaływanie plantacji na środowisko ma niewielkie znaczenie.

Odkrywkowa eksploatacja surowców mineralnych

Wydobycie i przetwórstwo rud żelaza, wapieni oraz węgla kamiennego skoncentrowane w centralnej i wschodniej części południowego skłonu Wyżyny Meghalaya było najstarszym, obok rolnictwa, zajęciem ludności (ryc. 12). Odkrywkowa eksploatacja surowców mineralnych, a zwłaszcza ich przetwórstwo, stały się z czasem istotnym czynnikiem prowadzącym do wylesiania. W dłuższym okresie dało to impuls do uruchomienia na dużą skalę erozji gleb.

Rudy żelaza

Najwcześniej, ok. 2000 lat temu, rozwinęło się wydobywanie i przetwórstwo żelaza związane z prekambryjskimi granitami, zawierającymi domieszkę magnetytu. Jednym z głównych obszarów wydobywania rud żelaza był granitowy batolit w okolicach Myllem w zlewni Umiew. Rudę wydobywano techniką odkrywkową, poprzez usuwanie warstwy zwietrzliny, którą następnie płukano w niewielkich strumieniach. Oczyszczona ruda była sprzedawana na lokalnych rynkach do dalszego przetopu (Yule, 1842; Oldham, 1854; Hooker, 1854). Dlatego, o ile wydobywanie rud żelaza było związane z konkretnym miejscem, to przetwórstwo było rozproszone na znacz-



Ryc. 12. Rozmieszczenie głównych ośrodków wydobywania i przetwórstwa surowców mineralnych w połowie XIX wieku na Wyżynie Meghalaya na tle mapy lasów z 1911 roku w skali 1:253 440
1 – rudy żelaza, 2 – wapień, 3 – węgiel kamienny

Fig. 12. The distribution of main centers of quarrying and processing of mineral resources in the middle of the XIX c. in the Meghalaya Plateau on the background of the forest map from 1911 at scale of 1:253 440.

1 – iron ore, 2 – limestone, 3 – coal

Opracowanie własne autora na podstawie (by the author on the basis of): Walters 1832, Yule 1842, Hooker 1854, Oldham 1854, Allen 1858, Hunter 1879.

nym obszarze wyżyny. Paliwem używanym w procesie dymarskim był wyłącznie węgiel drzewny produkowany z drzew porastających płaskowyż wyżyny (Yule 1842, Hooker, 1854). Większość żelaza była sprzedawana na Nizinie Bengalskiej, gdzie było przekuwane na gwoździe i klamry, wykorzystywane do łączenia desek łodzi rzecznych (Oldham, 1854). Upadek metalurgii związany z dostawami taniego żelaza z Anglii nastąpił na przełomie lat 60. i 70. XIX wieku (Hunter, 1879).

Zakładając średnią roczną wielkość eksportu na 1866,25 tony (Allen, 1858), oszacowano powierzchnię leśną, potrzebną do wyprodukowania węgla drzewnego dla wytopu tej ilości żelaza. Przyjmując, że technologia średniowieczna do wytopu 1 tony żelaza wymagała zużycia 65 m³ drewna (Mannion, 2001 za Bechmann, 1990), na całą produkcję potrzeba było 121 306 m³ drewna. Z 1 ha lasu tropikalnego można pozyskać średnio 90 m³ drewna (FAO, 1983). Do wyprodukowania wymienionej ilości żelaza musiało być co roku karczowane ok. 13,5 km² lasu.

Wykorzystując najstarsze informacje o pokryciu terenu z map w skali 1:253 440 z 1911 roku oraz numeryczny wysokościowy model terenu SRTM, można oszacować wylesioną powierzchnię w wyniku produkcji węgla drzewnego dla potrzeb wytopu żelaza do końca XIX wieku, na płaskowyżu powyżej 1000 m n.p.m. wzorem:

$$Pw = T + Ls, \{>1000 \text{ m n.p.m.}\}$$

gdzie: Pw – powierzchnia wylesiona na potrzeby wytopu żelaza do końca XIX wieku (km²)

T – powierzchnia zbiorowisk traw (km²) w 1911 roku

Ls – powierzchnia wtórnych lasów sosnowych, rosnących w miejscu wykarczowanego subtropikalnego lasu liściastego (km²) w 1911 roku.

Konstrukcja wzoru opiera się na założeniu, że obszar wyżyny był porośnięty subtropikalnym wiecznie zielonym lasem liściastym o składzie gatunkowym, jaki dziś występuje w zachowanych świętych lasach (Bor, 1942; Tiwari i in., 1999). Zbiorowiska traw reprezentują tereny wylesione, podobnie jak wtórna formacja lasów sosnowych. Trwałe wylesienie terenów poniżej 1000 m n.p.m. nie jest brane pod uwagę, ponieważ wynika w głównej mierze z karczunku lasu na potrzeby rolnictwa żarowego, zakładania pól ryżowych i plantacji lub pozyskania drewna opałowego. Obliczona powierzchnia zbiorowisk traw (T) wyniosła 3330 km², a lasów sosnowych (Ls) 540 km², dając w sumie 3870 km² powierzchni, na której zostały wykarczowane subtropikalne wiecznie zielone lasy liściaste (Pw). Na powierzchnię wylesioną w granicach południowego skłonu wyżyny przypadło z tego 2410 km². Dane zaokrąglono do 10 km².

Wapienie

Wydobycie i handel wapieniem, rozwinięte jeszcze w okresie przedkolonialnym, zostały niemal w całości

zmonopolizowane przez Brytyjczyków na przełomie XVIII i XIX wieku. Wypalanie wapieni koncentrowało się wzdłuż brzegów Surmy między Sunamganj a Chhatak (por. ryc. 1). Pozyskiwano w tym celu olbrzymie ilości drewna oraz trzciny, porastających podmokłe obszary u podnóża wyżyny (Oldham, 1854). Produkcja niemal w całości była przeznaczona dla potrzeb budownictwa w Kalkucie i Dhace. Jednak dopiero powstanie w 1961 roku cementowni, 2 km na południowy-zachód od Cherrapunji, znacząco zwiększyło eksploatację wapienia. Od lat 80-tych ponownie wzrasta wydobywanie w okolicy Shella u ujścia Umiew. Pomimo trwającego od kilku wieków wydobywania i przetwórstwa wapieni, miało ono wpływ na wylesienie jedynie niewielkich obszarów u podnóża południowego skłonu wyżyny.

Węgiel kamienny

Pokłady węgla występują w postaci wkładek o miąższości od 30 cm do 1,5 m na głębokości do 8 m pod powierzchnią ziemi w obrębie piaskowca wieku eoceńskiego. Eksploatacja zapoczątkowana w 1840 roku koło Cherrapunji, a w kilka lat później w okolicach Lakadong w Jaintia Hills nie była opłacalna i już w połowie XIX wieku kopalnie zostały zamknięte (Allen, 1858). Kontynuowano jedynie niewielkie wydobywanie na własne potrzeby miejscowej ludności. Dopiero lata 70. XX wieku przyniosły wzrost eksploatacji na przemysłową skalę, ponownie z pokładów w rejonie Lakadong, gdzie skupia się 74% obecnego wydobywania. Reszta przypada na obszar zlewni Umiew i Garo Hills. Negatywny wpływ eksploatacji węgla na środowisko w skali całej wyżyny miał niewielkie znaczenie. Zdecydowana większość kopalń powstała na terenach wcześniej wylesionych i glebach nienadających się pod uprawę. Przyczyniło się to raczej do utrwalenia już zastanego stanu środowiska.

Charakterystyka struktury użytkowania ziemi w zlewni Umiew

Charakterystykę struktury użytkowania ziemi w zlewni Umiew wykonano w oparciu o klasyfikację form użytkowania ziemi na zdjęciu satelitarnym. Wykonana mapa użytkowania w następnym etapie została wykorzystana do oceny wielkości erozji. Analizę treści na zdjęciu satelitarnym w zlewni Umiew utrudnia zarówno efekt zacienienia, typowy dla obszarów górskich, jak i bardzo duża mozaikowość form użytkowania o zbliżonym odbiciu spektralnym, typowa dla obszarów silnie przekształconych przez człowieka. Zastosowanie prostego wskaźnika roślinności NDVI do klasyfikacji wybranych form użytkowania nie jest wystarczające, ponieważ np. na proces erozji wpływa nie tylko gęstość najwyższego sklepienia roślin, ale także wewnętrzna struktura formacji roślinnej – wysokość poszczególnych warstw, stopień rozwoju runa leśnego, ilość ściółki na powierzchni gleby. Dokładność wykonania mapy użytkowania ziemi w oparciu o zdjęcie satelitarne wzrasta,

kiedy można zintegrować metody teledetekcyjne z wiedzą o badanym terenie w systemie GIS (Shrestha, Zinck, 2001).

Do klasyfikacji użytkowania ziemi w zlewni Umiew wykorzystano zdjęcie satelity IRS-1D z listopada 1998 roku. Zdjęcie znormalizowano w kanałach zielonym (0,52–0,59 μm), czerwonym (0,62–0,68 μm) i bliskiej podczerwieni (0,77–0,86 μm) równaniem:

$$NZ_i = 255 \cdot (Z_i / \Sigma Z_i) \quad i = 1 \dots n$$

gdzie: NZ_i – nowe zdjęcie z wartościami znormalizowanymi

Z_i – zdjęcie z wartościami oryginalnymi

255 – stała dopasowująca wartości do przedziału 0–255

Zastosowane równanie zminimalizowało wpływ rzeźby terenu na zróżnicowanie odbicia w poszczególnych kanałach oraz zbliżyło rozkład pikseli do normalnego (Shrestha, Zinck, 2001). Dało to możliwość zastosowania w pierwszym etapie klasyfikacji nadzorowanej z algorytmem maksymalnego prawdopodobieństwa. Na podstawie badań terenowych zdecydowano się początkowo na wydzielenie siedmiu form użytkowania ziemi: lasów liściastych, lasów sosnowych, zbiorowisk traw, upraw ryżu, upraw okopowych, wychodni skalnych i wód.

Dalsza procedura zależała od dokładności klasyfikacji. Wizualna ocena wykazała, że wyraźnie odróżniają się lasy od zbiorowisk traw, które w listopadzie już są suche i zawierają małą ilość chlorofilu. Natomiast lasy liściaste w niskich wysokościach sklasyfikowane zostały częściowo jako las sosnowy. Sprawdzone podczas badań terenowych, że zwarty las sosnowy nie występuje w zlewni poniżej 1600 m n.p.m. Wykorzystując polecenie warunkowe w języku modelowania kartograficznego (Magnuszewski, 1999), przeklasyfikowano las sosnowy poniżej 1600 m n.p.m. na las liściasty w oparciu o numeryczny model wysokościowy terenu, wykonany w skali 1:50 000 dla zlewni Umiew.

C = jeśli (A = „las sosnowy” i B < 1600 m n.p.m. to „las sosnowy” = „las liściasty”, A)

gdzie: A – mapa sklasyfikowana w oparciu o algorytm maksymalnego prawdopodobieństwa

B – mapa z numerycznym modelem wysokościowym terenu zlewni Umiew

C – nowa mapa

Utwórz mapę C, jeśli klasa na mapie A jest „lasem sosnowym” i wysokość na mapie B jest mniejsza niż 1600 m n.p.m., zastąp klasę „lasem liściastym”, gdy warunek nie zachodzi zachowaj klasy z mapy A.

Las liściasty nie jest jednolity, dlatego w jego obrębie wydzielono kategorie „las liściasty gęsty” i „las liściasty rzadki” o powierzchni koron drzew poniżej 40%. Przyjęta wartość progowa 40% odpowiada podziałowi stosowanemu przez FAO (1993) i FSI (2001). Zachowane reliktove płaty lasów świętych i chronionych w rejonie

zlewni Umiew zostały opisane przez botaników z Uniwersytetu w Shillongu z zastosowaniem powyższego podziału (Tiwari i in., 1999). Na zdjęciu satelitarnym zlokalizowano trzy płaty leśne. Po określeniu wskaźnika NDVI na każdym z płatów stwierdzono, że las rzadki charakteryzuje wartość wskaźnika poniżej 0,4. Następnie ponownie wykorzystano warunkowe polecenie w języku modelowania kartograficznego:

G = jeśli (C = „las liściasty” i D < 0,4 to „las liściasty” = „las liściasty rzadki”, C)

gdzie: G – nowa mapa

D – mapa wskaźnika NDVI

Utwórz mapę G, jeśli klasa na mapie C jest „lasem liściastym” i wartości wskaźnika NDVI na mapie B są mniejsze niż 0,4, zastąp klasę „lasem liściastym rzadkim”, gdy warunek nie zachodzi zachowaj klasy z mapy C.

Uprawy ryżu częściowo sklasyfikowane zostały jako zbiorowiska traw. Odbicie spektralne tej formy użytkowania tuż po zbiorach było zbliżone do zbiorowisk traw, rzadko porastających płytkie gleby. Pomiar w terenie wykazały, że ryż jest uprawiany w dolinach w odległości do 200 m od linii cieków, począwszy od drugiego rzędu w klasyfikacji Hortona-Strahlera (dolina musi być wystarczająco szeroka). Nachylenia pól uprawnych ryżu nie przekraczają na ogół 2°. Na podstawie zdigitalizowanej sieci rzecznej z map w skali 1:50 000, przygotowano mapę odległości od cieków drugiego rzędu w klasyfikacji Hortona-Strahlera z buforem 200 m. Klasyfikację przeprowadzono w dwóch etapach.

H = jeśli (G = „zbiorowiska traw” i I < 200 m to „zbiorowiska traw” = „uprawy ryżu”, G)

gdzie: H – nowa mapa

I – mapa odległości od cieków z buforem 200 m

Utwórz mapę H, jeśli klasa na mapie G jest „zbiorowiskami traw” i odległość od cieków drugiego rzędu na mapie B jest mniejsza niż 200 m, zastąp klasę „uprawami ryżu”, gdy warunek nie zachodzi zachowaj klasy z mapy G.

J = jeśli (H = „uprawy ryżu” i K > 2° to „uprawy ryżu” = „zbiorowiska traw”, H)

gdzie: J – nowa mapa

K – mapa nachyleń stoków

Utwórz mapę J, jeśli klasa na mapie H jest „uprawami ryżu” i nachylenie terenu na mapie K jest większe niż 2°, zastąp klasę „zbiorowiskami traw”, gdy warunek nie zachodzi zachowaj klasy z mapy H.

Pola z uprawami roślin okopowych podczas klasyfikacji algorytmem maksymalnego prawdopodobieństwa włączone zostały częściowo do wychodni skalnych. Po jesiennych zbiorach, gleba bez okrywy roślinnej daje odbicie spektralne zbliżone do otaczających skał. Głazy o średnicy kilku metrów leżą często bezpośrednio na

polu uprawnym, zwłaszcza w rejonie granitowych bałtytów, gdzie w przeszłości wydobywano rudy żelaza. Ponieważ pola uprawne roślin okopowych nie występują na stokach o nachyleniach większych niż 40° (Mishra, Ramakrishnan, 1983) założono, że powyżej tej wartości pola uprawne należy sklasyfikować jako wychodnie skalne, w oparciu o wykonaną mapę nachyleń stoków.

L = jeśli (J = „uprawy okopowe” i $K > 40^\circ$ to „uprawy okopowe” = „wychodnie skalne”, J)

gdzie: L – nowa mapa

Utwórz mapę L, jeśli klasa na mapie J jest „uprawami okopowymi” i nachylenie stoku na mapie K jest większe niż 40° , zastąp klasę „wychodniami skalnymi”, gdy warunek nie zachodzi zachowaj klasy z mapy H.

Sieć osadnicza bardzo słabo uwidacznia się na zdjęciu satelitarnym zlewni Umiew. Miejscowości, położone na pagórkowatym płaskowyżu, mają zbliżone odbicie spektralne do otaczających terenów zdegradowanych z wychodniami skalnymi. Wsie na obszarach leśnych zajmują małe powierzchnie, w które wkraczają drzewa wyższe od zabudowań. Obszary zabudowane zlokalizowano, kierując się rozmieszczeniem sieci osadniczej na mapach w skali 1:50 000. Następnie, stosując wizualną interpretację barwnej kompozycji FCC, zostały zdigitalizowane i włączone do sklasyfikowanego zdjęcia jako oddzielna forma użytkowania ziemi.

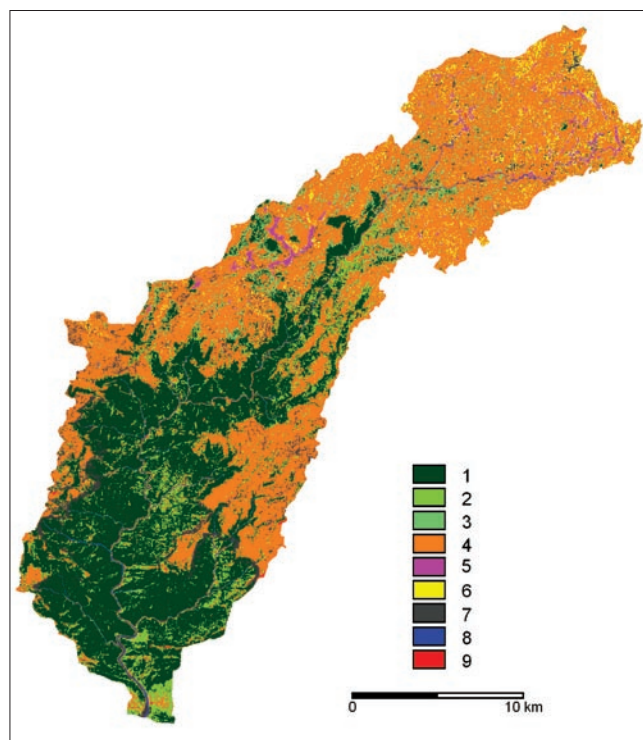
Końcową mapę przefiltrowano filtrem większościowym w celu zgeneralizowania. Średnia dokładność klasyfikacji (liczba pikseli prawidłowo sklasyfikowanych podzielona przez sumę pikseli z pól treningowych) wszystkich form użytkowania ziemi wyniosła 87%.

Wynikiem klasyfikacji zdjęcia satelitarnego jest mapa użytkowania ziemi zlewni Umiew (ryc. 13, tab. 4). W zlewni wybijają się dwie podstawowe formy użytkowania – lasy w kanionie i zbiorowiska trawiaste na pagórkowatym płaskowyżu. Tereny zajęte bezpośrednio pod uprawę ryżu i roślin okopowych stanowią tylko 3,7% powierzchni zlewni.

Zastosowanie modelu Revised Morgan-Morgan-Finney (RMMF) do oceny erozji wodnej w zlewni Umiew

Bezpośrednie pomiary erozji w rejonie zlewni Umiew ograniczyły się do pól uprawnych w okolicach Shillongu (Singh i in., 1981; Mishra, Ramakrishnan, 1983) oraz zbiorowisk traw porastających zdegradowane gleby koło Cherrapunji (Froehlich, 2004). Zastosowanie modelu jest uzupełnieniem przeprowadzonych badań, dającym przestrzenny obraz strat gleby.

Do oceny erozji wodnej w zlewni Umiew zastosowano model RMMF (Revised Morgan-Morgan-Finney), prognozujący wielkość erozji w skali rocznej (Morgan, 2001). Model został skonstruowany i zweryfikowany w górzystych obszarach Malezji w warunkach klimatu monsunowego (Morgan i in., 1984).



Ryc. 13. Mapa użytkowania ziemi w zlewni Umiew wykonana na podstawie klasyfikacji zdjęcia satelitarnego satelity IRS-1D z 1998 roku.

1 – lasy liściaste gęste, 2 – lasy liściaste rzadkie, 3 – lasy sosnowe, 4 – zbiorowiska traw, 5 – uprawy ryżu, 6 – uprawy okopowe, 7 – wychodnie skalne, 8 – wody, 9 – obszary zabudowane

Fig. 13. Land use map of the Umiew catchment prepared for the year 1998 on the basis of IRS-1D image classification from 1998

1 – dense deciduous forest, 2 – open deciduous forest, 3 – pine forest, 4 – grass communities, 5 – paddy rice, 6 – root crops, 7 – rock outcrops, 8 – water, 9 – built up areas

Tabela 4. Użytkowanie ziemi w zlewni Umiew w 1998 roku
Land use in the Umiew catchment in 1998

Lp.	Forma użytkowania ziemi Land use	Powierzchnia Area	
		(km ²)	(%)
1.	lasa liściaste gęste dense deciduous forests	171,8	34,8
2.	lasa liściaste rzadkie open deciduous forests	40,0	8,1
3.	lasa sosnowe pine forests	17,1	3,5
4.	zbiorowiska traw grass communities	230,4	46,7
5.	uprawy ryżu paddy rice	5,0	1,0
6.	uprawy okopowe root crops	13,1	2,7
7.	wychodnie skalne rock outcrops	11,1	2,2
8.	wody water	3,0	0,6
9.	obszary zabudowane built up areas	2,2	0,4

Aby obliczyć erozję przy użyciu modelu RMMF w systemie GIS należy opracować trzy bazy danych – opadów, użytkowania ziemi i właściwości gleb oraz wykonać mapę nachyleń stoku. Model RMMF dzieli erozję na dwie fazy. W fazie wodnej obliczana jest energia kinetyczna opadu dostępna dla oderwania gleby od podłoża i wielkość spływu powierzchniowego. W fazie erozji obliczana jest ilość gleby oderwanej od podłoża w wyniku rozbrzgu i splukiwania, którą następnie porównuje się ze zdolnością jej transportu przez spływ powierzchniowy. Dane użyte w równaniach oraz wynik równania reprezentują mapę numeryczną w GIS. Procedura obliczeń sprowadza się do rozwiązania kilkunastu równań.

Analizy wykonano dla średniej opadów z lat 1999–2000, reprezentujących zbliżoną do średniej wieloletniej

wysokość opadu w zlewni Umiew (tab. 5). Wszystkie dane z wyjątkiem kohezji gleb, ewapotranspiracji oraz częściowo intercepcji, uzupełnionych z tabel, zostały zebrane w terenie (tab. 6). Założono, że na polach roślin okopowych dominuje uprawa ziemniaków i kapusty, typowa dla północnej części zlewni Umiew.

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

$$ER = R \cdot A$$

Wykorzystując paski pluwiograficzne dla stacji Shillong i Cherrapunji w latach 1999–2000 obliczono średnie z maksymalnych wartości natężenia opadów z okre-

Tabela 5. Charakterystyka opadów w zlewni Umiew w latach 1999–2000

Rainfall characteristics in the Umiew catchment for the years 1999–2000

Stacja Station	Wysokość (m n.p.m.) Altitude (m a.s.l.)	Średni opad Average rainfall R (mm)	Średnia liczba dni z opadem Average number of rainy days R_n	Średni opad w dniu z opadem Average rain per rainy day R_o (mm)	Średnie maksymalne natężenie opadu erozyjnego I z przedziału 30 min. Average maximum of erosive rain intensity from 30 min. period (mm·h ⁻¹)
Shillong	1500	2322,4	180,5	12,9	25
Mawphlang	1840	3506,5	142,2	24,7	
Cherrapunji	1313	12379,5	174,5	70,9	35
Mawsynram	1420	13405,5	166,0	80,8	
Sylhet	35	4086,5	141,8	28,8	

Tabela 6. Parametry roślinności użyte w modelu związane z formą użytkowania ziemi

Plant parameters used in model connected with land use

Forma użytkowania ziemi Land use	A	CC	E_i/E_o	EHD	PH	GC	C
lasy liściaste gęste dense deciduous forests	0,35	0,98	1,00	0,20	15,0	0,98	0,001
lasy liściaste rzadkie open deciduous forests	0,35	0,90	1,00	0,20	8,0	0,95	0,002
lasy sosnowe pine forests	0,35	0,95	1,00	0,20	0,5	1,00	0,001
zbiorowiska traw grass communities	0,30	0,80	0,90	0,15	0,5	1,00	0,005
uprawy ryżu paddy rice	0,43	0,60	1,35	0,12	0,8	0,60	0,1
uprawy okopowe root crops	0,25	0,70	0,70	0,15	0,6	0,70	0,2

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

Proportion between 0 and 1 of the rainfall intercepted by the vegetation,

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

Percentage canopy cover, expressed as a proportion between 0 and 1,

E_i/E_o – stosunek ewapotranspiracji aktualnej do potencjalnej,

Ratio of actual to potential evapotranspiration,

EHD – efektywna hydrologicznie warstwa gleby kontrolująca spływ powierzchniowy (m),

Effective hydrological depth of soil (m),

PH – wysokość sklepienia roślin (m),

Plant height (m),

GC – procentowe pokrycie gleby wyrażone jako proporcja między 0 a 1,

Percentage ground cover, expressed as a proportion between 0 and 1

C – wskaźnik okrywy roślinnej C z uniwersalnego równania strat gleby (USLE).

Crop cover management factor of the Universal Soil Loss Equation (USLE).

su 30-minutowego (I). Przyjęto przy tym reguły dla najczęściej stosowanego uniwersalnego równania strat gleb (Wischmeier, Smith, 1978) zakładając, że jedna godzina bez deszczu oddziela dwa opady od siebie, opad poniżej 12,7 mm jest pomijany oraz że średnie natężenie opadu powinno przekroczyć $2,4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, a natężenie maksymalne z przedziału 30-minutowego powinno być wyższe od $13,3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Ponieważ tylko dwie stacje dysponują danymi z pluwiografów, dla pozostałych średnie z maksymalnych wartości natężenia opadu z okresu 30-minutowego (I) obliczono równaniem określającym zależność natężenia opadu (I) od jego sumy rocznej (R): $I = 0,0007 \cdot R + 10,26$.

Typowe wartości intercepcji (A) dla form użytkownika ziemi wyróżnionych na zdjęciu satelitarnym przyjęto za R.P.C. Morganem (1995). Wielkość intercepcji wraz ze spływem wody po pniach drzew dla lasu liściastego są zgodne z pomiarami R.S. Khiewtama (1986) w świętym lesie koło Cherrapunji.

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

$$DT = ER - LD$$

$$LD = ER \cdot CC$$

Przy obliczeniach sklepienia roślin założono, że w przypadku lasów liściastych gęstych występują ubytki w drzewostanie spowodowane naturalnymi powalami drzew (ok. 0,5% powierzchni lasu) oraz selektywną eksploatacją najcenniejszych gatunków (Roy, Tomar, 2001). Lasy liściaste rzadkie i sosnowe narażone są na karczowanie pod uprawę i w celu pozyskania drewna opałowego. Odsłonięcia powierzchni gleby są większe, ale krótkotrwałe w związku z jej szybką kolonizacją przez roślinność światłolubną (Morgan i in., 1984).

Energia kinetyczna opadu bezpośredniego ($KE(DT)$; $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$) obliczona została równaniem:

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

Równanie zakłada, że wraz ze wzrostem natężenia opadu jego energia kinetyczna rośnie. Po osiągnięciu wartości ok. $75 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, energia kinetyczna opadu stabilizuje się na pewnym poziomie, ponieważ krople deszczu ulegają rozbiciu nie osiągając dużej masy i tym samym prędkości (Wischmeier, Smith, 1978).

Energia kinetyczna opadu pośredniego ($KE(LD)$; $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$) obliczona została w oparciu o zmierzoną wysokość roślin (PH) równaniem C.J. Brandta (1990):

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

W wolnej atmosferze największe krople deszczu osiągają maksymalną prędkość po 8–9 metrach spadania. Na liściach w koronach drzew krople zmniejszają prędkość. Część z nich może łączyć się ze sobą osiągając większe rozmiary i ponownie duże prędkości pod koronami drzew, zwiększając zagrożenie erozją. Z kolei naj-

niższa warstwa runa leśnego zmniejsza energię kinetyczną opadu sięgającego ziemi. Dlatego wysokość (PH) musi odzwierciedlać wysokość najniższej warstwy roślin. W przypadku lasu z dobrze rozwiniętym runem, w równaniu należy przyjąć wysokość roślin równą zero lub kilku centymetrom (Brandt, 1990).

Energia kinetyczna opadu (KE ; $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$) jest sumą opadu bezpośredniego i pochodzącego z liści:

$$KE = KE(DT) + KE(LD)$$

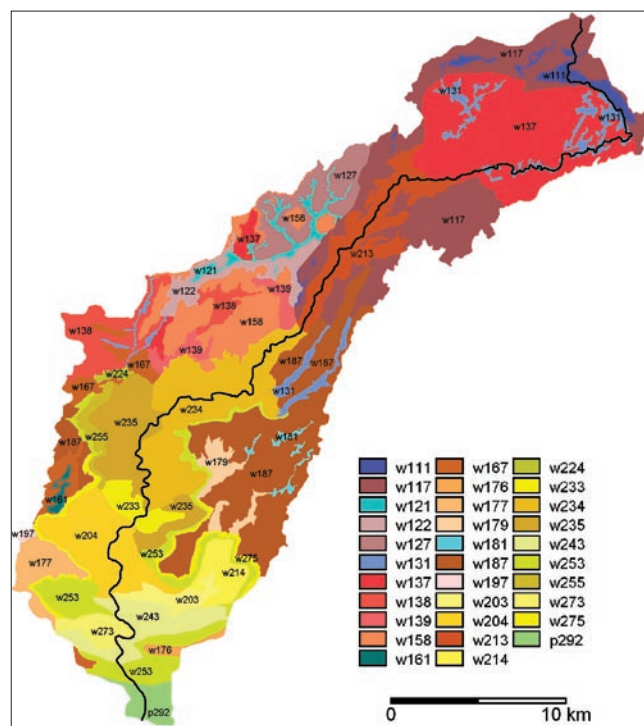
Rozbryzg (F ; $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) jest iloczynem wskaźnika podatności gleb na erozję (K) obliczonego w oparciu o analizy uziarnienia i zawartość materii organicznej wzorem W.H. Wischmeiera i D.D. Smitha (1978) oraz energii kinetycznej opadu (KE):

$$F = K \cdot KE \cdot 10^{-3}$$

Wielkość rozbryzgu informuje, jaka ilość gleby zostaje oderwana od podłoża w wyniku bombardującej działalności kropeł deszczu.

Wskaźnik podatności gleby na erozję (K ; $\text{g} \cdot \text{J}^{-1}$), definiowany jest jako stosunek jednostkowego zmywu gleby przypadający na jednostkę erozyjności opadu (Wischmeier, Smith, 1978). Wskaźnik można wyznaczyć z nomogramów, a jego wartości zazwyczaj wahają się między 0,1–0,4. Im wyższa wartość wskaźnika, tym większa podatność gleby na erozję.

Obliczone wartości wskaźnika K powiązano z mapą właściwości gleb wykonaną metodą geopedologiczną. Metoda zakłada, że istnieje zależność między rzeźbą



Ryc. 14. Mapa geopedologiczna zlewni Umiew (objaśnienia w tabeli 12)

Fig. 14. The geopedologic map of the Umiew catchment (explanations in the table 12)

terenu i typem gleb, a skala macierzysta, rzeźba i czas są głównymi czynnikami wpływającymi na formowanie się gleb (Shrestha, Zinck, 1998, ryc. 14, tab. 7). Podejście opiera się na konstrukcji czteropoziomowej struktury, począwszy od wydzielenia typu krajobrazu poprzez rzeźbę, litologię po zespół form. Wykonana mapa geopedologiczna jest uzupełnieniem map gleb w skali 1:250 000 oraz mapy geologicznej i topograficznej w skali 1:50 000. Na podstawie zróżnicowania rzeźby terenu: wysokości względnych i nachyleń stoków, wyróżniono w obrębie jednostek litologicznych zespoły form terenu. Następnie powiązано z nimi dominujące właściwości fizyczne i chemiczne gleb, które otrzymano z laboratoryjnych analiz prób gleb pobranych w terenie (tab. 7).

Spływ powierzchniowy (Q ; mm) obliczono równaniem M.J. Kirkby'ego (1976). Równanie zakłada, że spływ występuje gdy opad dobowy przekracza pojemność wodną gleby (R_c ; mm) i w ten sposób rozkład sum dobowych opadu zbliża się do rozkładu wykładniczego. Brany jest pod uwagę jedynie średni opad w dniu z opadem (R_o ; mm) obliczany przez podzielenie sumy rocznej opadu (R ; mm) przez liczbę dni z opadem (R_n):

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

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

Pojemność wodna gleby zależy od ciężaru objętościowego gleby (BD ; $Mg \cdot m^{-3}$) oraz polowej pojemności wodnej (MS ; % wagowe) określającej ilość wody, jaką gleba może zatrzymać przez pewien czas (2–4 dni) po opadach atmosferycznych i odpłynięciu wody grawitacyjnej. Efektywna hydrologicznie głębokość gleby (EHD ; m) wskazuje na miąższość warstwy gleby, której pojemność wodna jest w stanie kontrolować formowanie się spływu powierzchniowego. Wielkość EHD zależy w największym stopniu od pokrywy roślinnej, która wpływa na głębokość i gęstość korzeni oraz obecności szkieletu w glebie. Typowe wartości stosunku ewapotranspiracji rzeczywistej do potencjalnej (E_t/E_o) dla różnych form użytkowania przyjęto za R.P.C. Morganem (1995).

Splukiwanie (H ; $kg \cdot m^{-2}$) informuje, jaka ilość gleby zostaje oderwana od podłoża przez spływ powierzchniowy (Q), który wzrasta wraz z nachyleniem stoku (S ; stopnie). Przyjmuje się, że odspojenie cząstek gleby od podłoża występuje tylko w miejscach, gdzie gleba nie jest pokryta przez roślinność, szczątki organiczne i kamienie (GC):

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

Ze względu na trudności w pomiarze kohezji (COH ; kPa) w terenie (duża zawartość szkieletu w glebie i gęsty system korzeniowy zbiorowisk roślinnych), zgodnie z zaleceniem R.P.C. Morgana wykorzystano dane z tabel dla modelu EUROSEM (Morgan i in., 1998). Przyjęto średnie wielkości kompaktacji gleby w zależności od jej składu granulometrycznego i formy użytkowania ziemi (tab. 7).

Ilość oderwanej gleby od podłoża (D ; $kg \cdot m^{-2}$) jest sumą odspojonych cząstek gleby od podłoża w wyniku rozbrzygu (F) i splukiwania (H):

$$D = F + H$$

Zdolność transportu oderwanej gleby od podłoża przez spływ powierzchniowy (TC ; $kg \cdot m^{-2}$), zależna od wskaźnika okrywy roślinnej (C), spływu powierzchniowego (Q) i nachylenia stoku (S), obliczona została równaniem M.J. Kirkby'ego (1976):

$$TC = C \cdot Q^2 \cdot \sin S \cdot 10^{-3}$$

Współczynnik C zapożyczony z równania USLE jest wyznaczany z tabel (Wischmeier, Smith, 1978). Odzwierciedla łączny wpływ pokrywy roślinnej, sposobu uprawy i klimatu na wielkość erozji. Wartość współczynnika C dla gleby nie pokrytej roślinnością równa jest 1, a dla gęstego lasu z rozwiniętą niską roślinnością wynosi 0,001.

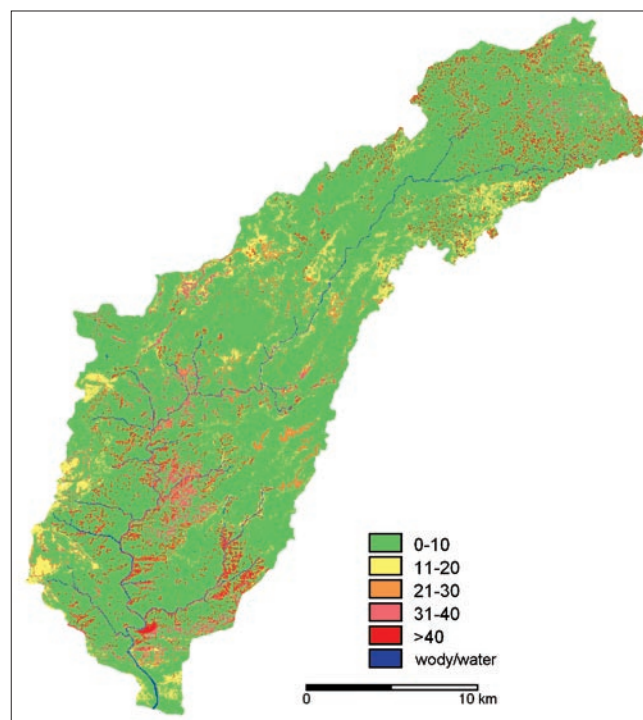
Ilość gleby oderwanej od podłoża (D) jest porównywana z możliwością jej transportu przez spływ powierzchniowy (TC). Mniejsza z tych dwóch wartości określa wielkość erozji ($kg \cdot m^{-2}$):

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

Jest to zgodne z założeniem, że wielkość erozji jest ograniczona ilością gleby dostępnej po oderwaniu od podłoża lub możliwością jej transportu przez spływ powierzchniowy.

Zagrożenie erozją wodną

W oparciu o założenia modelu RMMF opracowano mapę erozji gleb w zlewni Umiew (ryc. 15) oraz obliczo-



Ryc. 15. Straty gleby ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) związane z erozją wodną w zlewni Umiew

Fig. 15. Soil loss ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) due to water erosion in the Umiew catchment

Tabela 7. Jednostki geopedologiczne i związane z nimi właściwości gleb w zlewni Umiew.
Geopedologic units and connected with them soil properties in the Umiew catchment

Typ krajobrazu <i>Landscape</i>	Typ rzeźby <i>Relief type</i>	Litologia <i>Lithology</i>	Zespół form <i>Landform</i>	Jednostka geopedologiczna <i>Geopedological unit</i>	Podatność gleby na erozję <i>Soil detachability K (g·J⁻¹)</i>	Polowa pojemność wodna <i>Water holding at field capacity MS (% wagowe)</i>	Ciężar objętościowy <i>Bulk density BD (Mg m⁻³)</i>	Kohezja <i>Cohesion COH (kPa)</i>
wyzyna <i>upland</i>	pagórkowaty płaskowyż hilly plateau	kwarcyty <i>quartzites</i>	akumulacyjne dna dolin <i>alluvial valley floors</i>	w111	0,30	0,35	0,9	3
			wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w117	0,26	0,32	0,9	5
			akumulacyjne dna dolin <i>alluvial valley floors</i>	w121	0,39	0,42	1,1	3
		fyllity <i>phyllites</i>	silnie nachylone stoki 6–15° <i>slightly steep slopes 6–15°</i>	w122	0,32	0,42	1,1	3
			wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w127	0,32	0,35	1,1	5
		granity <i>granites</i>	akumulacyjne dna dolin <i>alluvial valley floors</i>	w131	0,24	0,39	0,9	3
			wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w137	0,18	0,22	1,1	7
			wyzyna płaska <i>flat upland</i>	w138	0,09	0,21	1,4	8
			zawieszzone doliny głęboko wcięte <i>deeply incised hanging valleys</i>	w139	0,18	0,22	1,1	3
		zlepienie <i>conglomerates</i>	wyzyna płaska <i>flat upland</i>	w158	0,12	0,19	1,4	8
			akumulacyjne dna dolin <i>alluvial valley floors</i>	w161	0,02	0,14	1,2	8
		piaskowce glaukonitowe <i>glauconitic sandstones</i>	wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w167	0,07	0,15	1,4	8
			szeroki grzbiet <i>wide ridge</i>	w176	0,23	0,38	1,0	5
			wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w177	0,07	0,23	1,2	8
		piaskowce żelaziste <i>ferruginous sandstones</i>	wyzyna płaska <i>flat upland</i>	w178	0,28	0,25	1,2	5
			zawieszzone doliny głęboko wcięte <i>deeply incised hanging valleys</i>	w179	0,18	0,40	0,8	3
		piaskowce i wapień <i>sandstones and limestones</i>	akumulacyjne dna dolin <i>alluvial valley floors</i>	w181	0,13	0,11	1,3	8
			wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w187	0,09	0,21	1,4	8
		wapienie <i>limestones</i>	wyzyna pagórkowata <i>hilly upland</i>	w197	0,07	0,25	1,4	8

Typ krajobrazu <i>Landscape</i>	Typ rzeźby <i>Relief type</i>	Litologia <i>Lithology</i>	Zespół form <i>Landform</i>	Jednostka geopedologiczna <i>Geopedological unit</i>	Podatność gleby na erozję <i>Soil detachability K (g·J⁻¹)</i>	Polowa pojemność wodna <i>Water holding at field capacity MS (% wagowe)</i>	Ciężar objętościowy <i>Bulk density BD (Mg m⁻³)</i>	Kohezja <i>Cohesion COH (kPa)</i>
wyzyna <i>upland</i>	system kanionów <i>system of canyons</i>	gnejsy <i>gneisses</i>	stromo zbocza 16–35° <i>steep slopes 16–35°</i>	w203	0,21	0,32	1,1	5
			bardzo strome zbocza 36–55° <i>very steep slopes 36–55°</i>	w204	0,21	0,32	1,1	5
		kwarcyty <i>quartzites</i>	stromo zbocza 16–35° <i>steep slopes 16–35°</i>	w213	0,19	0,35	1,1	7
			bardzo strome zbocza 36–55° <i>very steep slopes 36–55°</i>	w214	0,18	0,35	1,1	5
		fyllity <i>phyllites</i>	bardzo strome zbocza 36–55° <i>very steep slopes 36–55°</i>	w224	0,32	0,39	1,1	5
			stromo zbocza 16–35° <i>steep slopes 16–35°</i>	w233	0,15	0,33	1,1	5
		granity <i>granites</i>	bardzo strome zbocza 36–55° <i>very steep slopes 36–55°</i>	w234	0,15	0,30	1,3	5
			bardzo strome zbocza 36–55° i urwiska <i>very steep slopes 36–55° and scarps</i>	w235	0,12	0,30	1,3	5
		bazalty <i>basalts</i>	stromo zbocza 16–35° <i>steep slopes 16–35°</i>	w243	0,23	0,40	0,9	5
			stromo zbocza 16–35° <i>steep slopes 16–35°</i>	w253	0,15	0,25	1,2	5
		piaskowce glaukonitowe <i>glauconitic sandstones</i>	bardzo strome zbocza 36–55° i urwiska <i>very steep slopes 36–55° and scarps</i>	w255	0,14	0,25	1,2	5
			stromo zbocza 16–35° <i>steep slopes 16–35°</i>	w273	0,18	0,26	1,3	5
		piaskowce żelaziste <i>ferruginous sandstones</i>	bardzo strome zbocza 36–55° i urwiska <i>very steep slopes 36–55° and scarps</i>	w275	0,09	0,25	1,2	5
			silnie nachylone stoki 6–15° <i>slightly steep slopes 6–15°</i>	p292	0,11	0,30	1,2	7
podnóże wyżyny <i>upland foothill</i>	zrzucony stożek <i>upland step-fault</i>	wapienie <i>limestones</i>						

no wielkość erozji dla poszczególnych form użytkowania ziemi (tab. 8). Otrzymane wyniki reprezentują przeciętne straty gleby w latach, kiedy opad w zlewni Umiew zbliżony jest do średniej wieloletniej.

Tabela 8. Wielkość erozji ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) w zależności formy użytkowania ziemi w zlewni Umiew
Soil erosion ($t \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$) per land use class in the Umiew catchment

Forma użytkowania ziemi <i>Land use</i>	Zakres <i>Range</i>	Średnia <i>Average</i>	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i>
lasy liściaste gęste <i>dense deciduous forests</i>	0,1–15,5	7,7	5,0
lasy liściaste rzadkie <i>open deciduous forests</i>	0,2–88,0	40,0	24,0
lasy sosnowe <i>pine forests</i>	0,1–13,5	4,5	3,0
zbiorowiska traw <i>grass communities</i>	0,0–53,2	23,4	14,0
uprawy ryżu <i>paddy rice</i>	0,0–4,0	0,9	0,1
uprawy okopowe <i>root crops</i>	0,2–144,9	60,6	36,0

Prognozowana przez model wielkość erozji zawiera się w przedziale $0\text{--}145 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (wielkości przeliczono z $kg \cdot m^{-2}$). Najwyższe wartości powinny być traktowane ostrożnie. Wykazują je pojedyncze piksele, które mogą być wynikiem niedokładnej dygitalizacji zasięgu jednostek geopedologicznych czy klasyfikacji użytkowania ziemi na zdjęciu satelitarnym (Prokop, 1998). Duży zakres zmienności erozji na poszczególnych formach użytkowania ziemi wynika z heterogeniczności środowiska przyrodniczego zlewni Umiew. Lasy liściaste i zbiorowiska traw występują zarówno w strefie opadów sięgających 2500 mm jak i 12000 mm rocznie. Uprawy okopowe zajmują płaskie dna dolin jak i stoki o nachyleniach do 40° .

Najdokładniej można prognozować wielkość erozji na polach ryżowych. Występuje tu ścisła zależność między rodzajem uprawy – monokultura, formą rzeźby – dna doliny oraz typem gleb – gliny o podobnej pojemności wodnej i zawartości materii organicznej. Również zabiegi agrotechniczne są jednolite na całym polu, z jednym zbiorem w ciągu roku. Erozja na polach ryżowych na ogół nie przekracza $1 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Pomimo dużego rozbryzgu, jest ona ograniczona małą zdolnością transportu cząstek gleby przez spływ powierzchniowy na płaskim terenie.

Najwyższe wartości erozji obliczone w oparciu o model, do $145 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (średnio $60 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$), występują na obszarach zajętych przez uprawy roślin okopowych w północnej części zlewni w zasięgu wysokich, 2500–6000 mm, chociaż nie najwyższych opadów. Wynika to z intensywnej gospodarki rolnej na krótkich

i stromych stokach. Prognozowane przez model wyniki zbliżone są do obserwowanej erozji w okolicach Shillongu. Najwyższe wartości erozji $170 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ zmierzono na polkach eksperymentalnych (Singh i in., 1981). Na polach z uprawą ziemniaków, obejmujących stoki o nachyleniu do 40° notowano straty gleby sięgające $56 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (Mishra, Ramakrishnan, 1983).

Na stromych zboczach kanionu zwarte korony drzew, gęste piętra krzewów i poszycia stanowią skuteczną ochronę przed erozją. W efekcie, pomimo ekstremalnie wysokich opadów wielkość erozji nie odbiega znacząco od innych obszarów tropikalnych. Pomiar erozji na polach z rolnictwem żarowym *jhum*, jakie przeprowadzono w latach 1999–2000 w Chittagong Hills w Bangladeszu (Gafur i in., 2003), wskazują na erozję $41 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ przy rocznym opadzie ok. 3000 mm. Po zaprzestaniu uprawy, na polu pozostawionym odłogiem, straty gleby zmniejszyły się do ok. $3\text{--}4 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Można przyjąć, że przy tym samym systemie upraw i wyższym opadzie w zlewni Umiew zmierzone wartości są dolną granicą erozji, jaka może wystąpić w przypadku wykarczowania pola na potrzeby rolnictwa żarowego. Wyższe wartości erozji występują jedynie w obrębie lasu liściastego o większym stopniu degradacji.

Na najbardziej zdegradowanym obszarze pagórkowatego płaskowyzu, w zasięgu najwyższych opadów 10 000–12 000 mm rocznie, erozja nie przekracza $10 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Badania z wykorzystaniem radioizotopów ^{137}Cs i $^{210}Pb_{ex}$ wykazały, że erozja osiąga wielkość rzędu $2 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ (Froehlich, 2004). Niewielkie straty gleby wynikają z ochronnej roli zbiorowisk trawiastych i bruku wykształconego w powierzchniowym poziomie gleby.

Wnioski

Przebieg procesów degradacji środowiska przyrodniczego południowego skłonu Wyżyny Meghalaya oraz dotychczasowe hipotezy na ten temat, wskazują, że wylesienie i degradacja gleb, odziedziczone z przeszłości, są wynikiem współdziałania naturalnych zdarzeń ekstremalnych, ekspansji rolnictwa żarowego związanej z przyrostem ludności oraz wydobycia i przetwórstwa surowców mineralnych.

Naturalne zdarzenia ekstremalne są dominującą siłą prowadzącą do dużych zmian w środowisku przyrodniczym południowego skłonu wyżyny od tysięcy lat. Skutki zdarzeń ekstremalnych różnią się istotnie między dwoma typami rzeźby i związanych z nimi formami użytkowania ziemi w zlewni Umiew: zalesionym kanionem i pagórkowatym płaskowyzem porośniętym zbiorowiskami traw.

Na stromych zboczach kanionu rozlewne opady, sięgające 20–25% średniej sumy rocznej w ciągu 3–4 dni, przyczyniają się do rozwoju głębokich osuwisk i degradacji szaty roślinnej. Tego typu ekstremalne zdarzenia występują w zlewni Umiew raz na kilkadziesiąt lat. Natomiast okres powtarzalności płytkich osuwisk

i splywów, rozwijających się wskutek lokalnych ulew, wynosi mniej niż 1 rok. Czas relaksacji systemu w ciągu 2–3 lat jest zbliżony do obserwowanego w innych obszarach tropikalnych.

Powierzchnia pagórkowatego płaskowyżu okolic Cherrapunji i Mawsynram, gdzie faza największej erozji wystąpiła w przeszłości bezpośrednio po wylesieniu, jest obecnie bardzo odporna na zdarzenia ekstremalne. Żwirowo-głazowy bruk w powierzchniowym poziomie gleby skutecznie powstrzymuje również rozwój osuwisk. Jedynie północna część zlewni Umiew, z grubszą warstwą zwietrzliny jest nadal narażona na rozwój płytkich osuwisk. Występująca lokalnie na tym terenie duża erozja pod uprawami okopowymi, sięgająca do $145 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ (średnio $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$), jest najwyższa w zlewni.

Zdarzenia ekstremalne takie jak osuwiska, nie są jednak w stanie trwale pozbawić pokrywy leśnej dużego obszaru wyżyny w dłuższym okresie. Świadczą o tym zachowane reliktywne lasy klimaksowe w strefie najwyższych opadów. Dlatego zmiany, jakie zaszły w środowisku przyrodniczym wskazują, że do jego degradacji musiał przyczynić się człowiek.

Jednak dotychczasowej hipotezie wiążącej wylesienie wyżyny z ekspansją rolnictwa żarowego *jhum* przeczą opisy przyrodników oraz mapy z pierwszych kartowań zaświadczające o całkowitym wylesieniu górnej części wyżyny już w początkach XIX wieku. Wylesienie i degradacja gleb na wyżynie nastąpiły więc zanim w istotny sposób wzrosło zaludnienie w drugiej połowie XX wieku. Charakterystyczna jest również zaobserwowana na zdjęciach satelitarnych koncentracja tego systemu uprawy do wysokości 1000 m n.p.m. w zachodniej części południowego skłonu. Natomiast niemal całkowicie wylesiona została powierzchnia płaskowyżu powyżej tej wysokości w centralnej i wschodniej części wyżyny.

Porównanie rozmieszczenia ośrodków wydobywania i przetwórstwa surowców mineralnych w połowie XIX wieku z mapą z 1911 roku, wykazało wyraźny związek między występowaniem ośrodków wydobywania i przetwórstwa żelaza a obszarami zdegradowanymi na pagórkowatym płaskowyżu. Skłania to do postawienia hipotezy, że główną przyczyną wylesienia wyżyny była produkcja węgla drzewnego na potrzeby wytopu żelaza. Wylesienie prawie 4000 km^2 płaskowyżu powyżej 1000 m n.p.m. (z tego 2410 km^2 na południowym skłonie), musiało trwać przynajmniej kilkaset lat. Działalność człowieka w postaci wypalenia i wypasu nadal skutecznie powstrzymuje sukcesję lasów liściastych utrwalając stan środowiska odziedziczony z przeszłości.

Realizacja tematu była możliwa dzięki współpracy Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn IGiPZ PAN z Department of Geography North-Eastern Hill University w Shillongu w ramach umowy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z Department of Science and Technology w Indiach.

Literatura

- Agriculture and Soil Division, IIRS, 1987: *Report on soil and land use survey of Meghalaya*, Gov. India, Dehra Dun.
- Allen W.J., 1858: *Report on the administration of the Cossyah and Jynteah Hill territory*, Bengal Hurkaru, Calcutta.
- Bor N.L., 1942: *Relict vegetation of Shillong Plateau-Assam*, Indian Forest Rec., vol. 3, no. 6, 152–195.
- Brandt C.J., 1990: *Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops and throughfall drops*, Earth Surf. Proc. Land., vol. 15, 687–698.
- Census of India, 1872–2001: London, New Delhi.
- Ciołkosz A., Kęsik A., 1989: *Teledetekcja satelitarna*, PWN, Warszawa.
- Department of Space, 1983: *Mapping of forest cover in India from satellite imagery 1972–75 and 1980–82*, Gov. India, Hyderabad.
- Directorate of Economics and Statistics, Meghalaya, 2001: *District-wise jhummi families of Meghalaya*, Gov. Meghalaya, Shillong.
- FAO, 1983: *Simple technologies for charcoal making*, FAO Forest. Paper, 41, Rome.
- FAO, 1993: *Forest resources assessment 1990*, Tropical Forest. Paper, 112, Rome.
- Froehlich W., 2004: *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*, 138–146, IAHS Publ., 288.
- FSI, 1989: *The state of forest report*, Forest Surv. India, Dehra Dun.
- FSI, 2001: *The state of forest report*, Forest Surv. India, Dehra Dun.
- Gadgil M., Joshi N.V., Shambu Prasad U.V., Manoharan S., Patil S., 1997: *Peopling of India*, [w:] D. Balasubramanian, N. Appaji Rao (red.), *The Indian Human Heritage*, Univ. Press, Hyderabad, India, 100–129.
- 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, no. 274, 30–46.
- GSI, 1974: *Geology and mineral resources of the states of India, part IV, Meghalaya*, Geol. Surv. India, Misc. Publ., vol. 30, 69–90.
- Hooker J.D., 1854: *The Himalayan journals*, J. Murray, London.
- Hunter W.W., 1879: *A statistical account of Assam*, vol. 2, Trubner&Co, London.
- IGU Commission on Applied Geomorphology, 1968: *Project on the unified key to the detailed geomorphological map of the world*, Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys., vol. 2, 1–40.
- International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 1997: *ILWIS – The integrated land water information system. User's guide*, Enschede, The Netherlands.
- Khiewtam R.S., 1986: *Ecosystem function of protected forests of Cherrapunji and adjoining areas*, Praca doktorska, NEHU, Shillong.
- Kirkby M.J., 1976: *Hydrological slope models: the influence of climate*, [w:] E. Derbyshire (red.), *Geomorphology and climate*, 247–267, J. Wiley, London.
- Magnuszewski A., 1999: *GIS w geografii fizycznej*, PWN, Warszawa.
- Mannion A.M., 2001: *Zmiany środowiska Ziemi. Historia środowiska przyrodniczego i kulturowego*, PWN, Warszawa.

- 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 Envir., vol. 9, 69–82.
- Misra V.N., 2001: *Prehistoric human colonization of India*, J. Biosciences, vol. 26, no. 4, 491–531.
- Morgan R.P.C., 1995: *Soil erosion and conservation*, Longman, New York.
- Morgan R.P.C., 2001: *A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model*, Catena, vol. 44, 305–322.
- Morgan R.P.C., Morgan D.D.V., Finney H.J., 1984: *A predictive model for the assessment of soil erosion risk*, J. Agric. Eng. Res., vol. 30, 245–253.
- Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Auerwald K., Chisci G., Torri D., Styczeń M.E., Folly A.J.V., 1998: *The European soil erosion model (EUROSEM): Documentation and user guide*, Silsoe College, Cranfield Univ.
- Oldham T., 1854: *On the geological structure of part of the Khasi Hills*, Bengal Mem. Geol. Surv. India I, pt. 2.
- Pemberton R.B., 1835: *Report on the eastern frontier of British India*, Gov. India, Calcutta.
- Prokop P., 1998: *Jakość danych a błąd i niepewność w systemach informacji geograficznej z punktu widzenia badań środowiska przyrodniczego*, [w:] M. Kistowski (red.), Systemy informacji geograficznej w badaniach środowiska przyrodniczego, Problemy ekologii krajobrazu, t. IV, 33–42, Gdańsk.
- Prokop P., 2005: *Natural hazards and anthropogenic impact on environment in a tropical mountain catchment, Meghalaya Hills, India*, Studia Geom. Carp.-Balc., vol. 39, 95–113.
- Ramakrishnan P.S., 1992: *Shifting agriculture and sustainable development: An interdisciplinary study from North-Eastern India*, UNESCO-MAB Ser., Parthenon Publ., Paris.
- Ramakrishnan P.S., Kushwaha S.P.S., 2001: *Secondary forests of the Himalaya with emphasis on the north-eastern hill region of India*, J. Trop. Forest Sc., vol.13, no. 4, 727–747.
- Richards J.F., Flint E.P., 1994: *Historic land use and carbon estimates for South and Southeast Asia: 1880–1980*, Carbon Dioxide Inf. Anal. Center, Oak Ridge Nat. Lab., Publ. 4174, (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp046.html>).
- Roy P.S., Joshi P.K., 2002: *Forest cover assessment in north-east India – the potential of temporal wide swath satellite sensor data (IRS-1C WiFS)*, Int. J. Remote Sens., vol. 23, no. 2, 4881–4896.
- Roy P.S., Tomar S., 2001: *Landscape cover dynamics pattern in Meghalaya*, Int. J. Remote Sens., vol. 22, no. 18, 3813–3825.
- Shrestha D.P., Zinck J.A., 1998: *Land degradation assessment using geographic information system: A case study in the middle mountain region of the Nepalese Himalaya*, [w:] D.P. Rao (red.), Trends in Geoinformatics Technology and Applications. The Proceedings Vol., 9–11 March, IIRS, Dehradun, 391–409.
- Shrestha D.P., Zinck J.A., 2001: *Land use classification in mountainous areas: integration of image processing, digital elevation data and field knowledge (application to Nepal)*, Int. J. Applied Earth Obs. Geoinf., vol. 3, no. 1, 78–85.
- Singh G., Babu R., Chandra S., 1981: *Soil loss predictions in India*, CS&WCRTI, Bull. No 12/D9, Dehra Dun, India.
- Soja R., Singh S., 2004: *The rainfall characteristics*, [w:] L. Starkel, S. Singh (red.), Rainfall runoff and soil erosion in the globally extreme humid area, Cherrapunji region, India, Prace Geogr., vol. 191, 59–71.
- Starkel L., 1972: *The modelling of monsoon areas of India as related to catastrophic rainfalls*, Geogr. Polonica, vol. 23, 151–173.
- Starkel L., 1996: *Present-day formation of the Southern part of Meghalaya Plateau*, Hill Geographer, vol. 12, no. 1–2, 13–19.
- Starkel L., Singh S. (red.), 2004: *Rainfall, runoff and soil erosion in the globally extreme humid area, Cherrapunji region, India*, Prace Geogr., vol. 191.
- Stocking M.A., Murnaghan N., 2000: *Handbook for the field assessment of land degradation*, Earthscan Publ., London.
- Tiwari B.K., Barik S.K., Tripathi R.S., 1999: *Sacred forests of Meghalaya. Biological and cultural biodiversity*, NEHU, Shillong.
- Toky O.P., Ramakrishnan P.S., 1983: *Secondary succession following slash and burn agriculture in North-Eastern India. 1. Biomass, litterfall and productivity*, J. Ecology, vol. 71, 735–745.
- Walters H., 1832: *Journey across the Pandua Hills, near Silhet, in Bengal*, Asiatic Res., vol. 17, 499–512.
- Whitmore T.C., 1991: *Tropical rain forests*, Clarendon Press, Oxford.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978: *Predicting rainfall erosion losses*, USDA, Agricultural Research Service Handbook, 537, Washington.
- Yule H., 1842: *Notes on the iron of the Khasia Hills*, J. Asiatic Soc. Bengal, vol. 11, 853–857.



Dr Paweł Prokop ukończył studia w Instytucie Geografii na Uniwersytecie Jagiellońskim. Od 1991 roku pracuje w Zakładzie Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn w Instytucie Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Zainteresowania naukowo-badawcze koncentrują się wokół zastosowania technik komputerowych w geografii fizycznej. W 1997 roku przebywał na stypendium w International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) w Holandii, a w 1998 roku w Indian Institute for Remote Sensing Research (IIRS) w Indiach. Zdobyte doświadczenie znalazło wyraz w wykorzystaniu Systemów Informacji Geograficznej (GIS) w badaniach nad rolą człowieka w przekształcaniu środowiska przyrodniczego, a w szczególności wylesianiem, wpływem i erozją gleb w klimacie monsunowym Indii.