

Przekształcenia powierzchni stokowych w Sudetach w wyniku procesu saltacji wykrotowej

Disturbance of hillslope surfaces due to the tree uprooting process in the Sudetes Mts., SW Poland

Łukasz Pawlik

*Zakład Geomorfologii, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław
lukasz.pawlik@uni.wroc.pl*

Zarys treści: W artykule przedstawiono dotychczasowe wyniki badań nad saltacją wykrotową w piętrze regla dolnego i górnego polskiej części Sudetów. Badania przeprowadzono na trzech wybranych obszarach w obrębie Gór Suchych, Gór Stołowych i Karkonoszy. Ze względu na charakter poligonów badawczych i stopień zachowania form posaltacyjnych przyjęto odmienne metody badawcze dla każdego z nich. Średnia objętość materiału przemieszczonego wraz z systemem korzeniowym każdego powalonego drzewa wyniosła w Górach Suchych 4 m³. Pomiary reliktowych form zagłębień i kopców ziemnych na poligonie badawczym w Górach Stołowych wykazały stopień pokrycia powierzchni stoku rzędu 4,7%. Rezultaty pomiarów tempa degradacji karp powalonych drzew w Karkonoszach mieszczą się w bardzo szerokim zakresie od 2 do 61 g dobę⁻¹. Jednocześnie w Karkonoszach stwierdzono, że razem z systemem korzeniowym drzew przemieszczeniu ulegają nawet fragmenty skalne frakcji blokowej. Stopień przekształcenia powierzchni stoku oraz wpływ saltacji wykrotowej na inne procesy geomorfologiczne i komponenty środowiska leśnego wskazuje, że odgrywa ona szczególną rolę w systemie denudacyjnym stoku zalesionego. Jednocześnie nadal nieznany jest zakres, w jakim proces ten wpływa na denudacyjny bilans stoku. Ze względu na stopień zaawansowania badań w Sudetach oraz na innych obszarach Polski rozwiązanie tego zagadnienia wymaga znacznie większego zbioru danych ilościowych, co implikuje kontynuację pomiarów terenowych i dalszą analizę uzyskanych wyników.

Słowa kluczowe: saltacja wykrotowa, karpa, stok zalesiony, denudacja, Sudety

Summary: This article presents preliminary results of the study on the tree uprooting process in the lower and upper montane belt in the Polish part of the Sudetes Mts., SW Poland. The fieldwork was carried out in three different research sites set up in the Suche, Stołowe and Karkonosze Mts. Because of the character of these locations, mainly the degree of deterioration of so called pit-and-mound microtopography, different research methods were applied. The research is currently at various degree of progress in each site and requires further continuation. However, some preliminary results are already available. Mean volume of transported soil-weathering material in the root plate of each uprooted tree was 4 m³ in the Suche Mts. In the Stołowe Mts. pit-and-mound microtopography covers 4.7% of the research polygon and calculated mean volume of the mounds and pits were 1.7 and 1.6 m³ respectively. Values of the root plates deterioration in the Karkonosze Mts. are between 2 and 61 g day⁻¹, with the smallest rate recorded during a cold season (from November to May). Simultaneously, together with the root systems of fallen trees even boulders of granite bedrock (>1 m of diameter) were exposed above the ground in the area. The observable degree of the hillslope surface disturbance due to tree uprooting, its influence on other geomorphological processes and forest environmental components suggests that the tree uprooting process performs a very distinct and significant role in the denudation system of forested hillslopes in the Polish Sudetes. However, it is still unknown to what extent the process affects the denudation balance, and for a proper evaluation of this issue further field studies and data are necessary.

Key words: tree uprooting, root plate, forested hillslope, denudation, Sudetes

Wstęp

Saltacja wykrotowa (ang. *tree uprooting*, *tree throw*) jest procesem naturalnym zachodzącym we wszystkich ekosystemach leśnych (Stephens 1956, Schaetzl 1986). Ponieważ wpływa on w sposób bezpośredni na obieg materii, powinien być uwzględniony w systemie geomorfologicznym stoku zalesionego. Transport materiału mineralnego jest zwykle wiązany z obecnością wody, jednak może on ulegać transportowi także poprzez czynniki biologiczne związane z aktywnością flory i fauny. Jednym z bardziej spektakularnych przykładów takiej zależności jest wynoszenie elementów mineralnych w korzeniach powalanych drzew podczas epizodów huraganowego wiatru. Jak dotychczas modelowe ujęcia systemu denudacyjnego gór średnich w Polsce nie uwzględniały, mimo powszechności występowania i wyraźnych efektów morfologicznych na stoku, procesu saltacji wykrotowej (por. Bieroński i in. 1992, dla Karkonoszy). Wyjątkiem są: mapa współczesnych procesów morfogenetycznych Tatr Polskich (Kotarba 2002, Rączkowska 2008) oraz włączenie saltacji (denudacji) wykrotowej do systemu stokowego Karkonoszy, w nawiązaniu do pięter geoekologicznych (Parzóch i in. 2008). Na innych obszarach na świecie podkreślana jest zarówno powszechność procesu saltacji wykrotowej, jak i jego niewątpliwym wpływ na procesy pedogenezy i dynamikę ekosystemów leśnych (por. np. Lyford, MacLean 1966).

Podjęte badania mają na celu określenie stopnia przekształcenia powierzchni stokowych w piętrze leśnym Sudetów Polskich przez proces saltacji wykrotowej. Celem pośrednim jest zweryfikowanie poglądu o małej dynamice rzeźby stoków piętra leśnego gór średnich pod względem procesów *stricte* geomorfologicznych. Aby przeanalizować tak przedstawiony problem, w badaniach uwzględniono zarówno formy współczesne w postaci karp i zagłębień, jak i reliktowe formy kopców tworzących razem z zagłębieniami specyficzny relief stoku zwany morfologią wykrotową.

Saltacja wykrotowa – znaczenie i zakres pojęcia

Saltacja wykrotowa (denudacja wykrotowa wg klasyfikacji współczesnych procesów geomorfologicznych, Kotarba 2002, Rączkowska 2008) oznacza transport materiału zwietrzelinowego tkwiącego w systemie korzeniowym powalonego drzewa (tzw. karpie¹). Polega ona na wyrwaniu z pokrywy stkowej wraz z korzeniami drzew pewnej ilości utworów mineralnych oraz przemieszczeniu i osadzeniu ich w

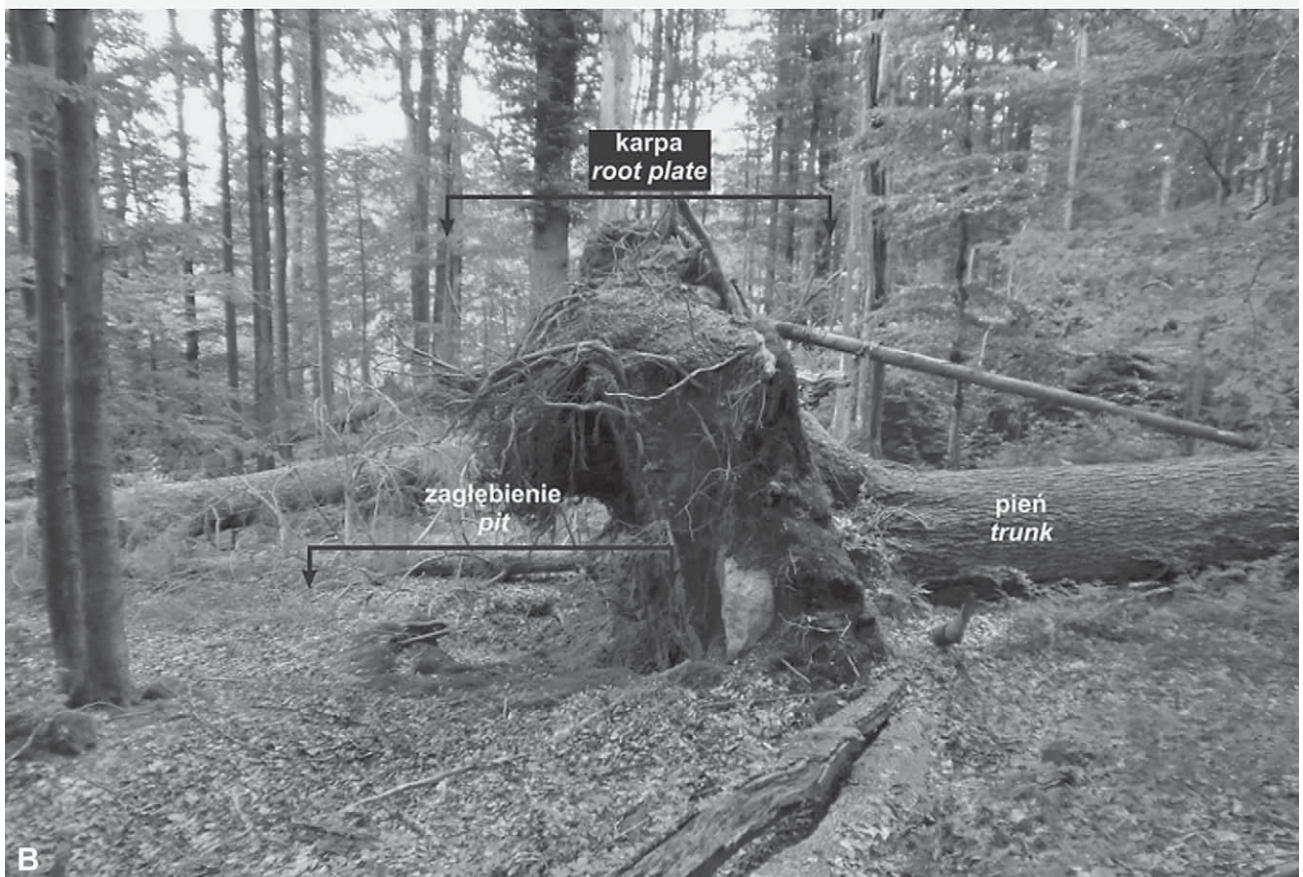
niedalekiej odległości od miejsca wyrwania (Gerlach 1976) (ryc. 1). Nazwa poprzez analogię nawiązuje do jednego z rodzajów transportu w systemie fluwialnym oraz eolicznym, tj. saltacji (ang. *saltation*), czyli transportu ruchem skokowym, w odróżnieniu od trakcji (włoczenie i toczenie) i suspensji (transport w zawieszeniu).

W polskiej literaturze geomorfologicznej proces saltacji wykrotowej zaliczany jest do niszczącej działalności wiatru, a kopce i zagłębienia wykrotów do form pochodzenia eolicznego (Klimaszewski 1981). W literaturze anglosaskiej jest on zaliczany do procesów biogeomorfologicznych, bezpośrednio lub pośrednio związanych z produktywnością biologiczną (Phillips 2009), a z punktu widzenia procesów glebowych rozpatrywany jest jako jeden z elementów bioturbacji (np. Gabet i in. 2003) lub pedoturbacji (Schaetzl, Anderson 2005). Pojęcie wykrot w leśnictwie oznacza „jamę pod korzeniami drzewa wyrwconego przez wiatr” (Mała encyklopedia leśna 1991, s. 590), choć niekiedy używane jest zamiennie z karpą lub miejscem zajęтым zarówno przez karpę, jak i zagłębienie.

Saltacja wykrotowa jako proces geomorfologiczny w bezpośredni sposób zmienia mikrorzeźbę stoku. Ze względu na transport znacznej ilości materiału skalnego z każdym powalonym drzewem (w skrajnych przypadkach do 17 m³) (Gabet i in. 2003) może odgrywać zasadniczą rolę w denudacji masywu górskiego. Bezpośrednim efektem morfologicznym widocznym na powierzchni przemodelowanego stoku jest tzw. mikrotopografia zagłębień i kopców ziemnych (ang. *pit and mound microtopography*) (Liechty i in. 1997), nazywana również morfologią wykrotową (Parzóch 2001). Objętość pojedynczych kopców może dochodzić do 10 m³ (Norman i in. 1995), natomiast tempo wypełniania zagłębień do 8 cm/rok w lasach strefy tropikalnej (Putz 1983). W dotychczasowych badaniach powierzchnia leśna zajmowana przez morfologię wykrotową szacowana była od 0,09% (USA, Arkansas; Panama) do 90% (Rosja) całkowitej powierzchni poligonu badawczego (Samonil i in. 2010).

Na obszarach zalesionych nie będących pod wpływem gospodarczej działalności człowieka proces saltacji wykrotowej jest zjawiskiem powszechnym i należy do ważniejszych elementów dynamiki ekosystemów leśnych (Samonil i in. 2010). Wpływa przede wszystkim na mikrorelief podłoża zarówno poprzez współczesne naruszanie pokryw stokowych (karpa, zagłębienie), jak i poprzez reliktowe formy posaltacyjne w postaci kopców i zagłębień. Kopce, najczęściej o eliptycznym zarysie w planie, powstają w miejscach zdegradowanych i rozłożonych karp

¹ Karpa to pniak i korzenie pozostałe po ścięciu drzewa (Mała encyklopedia leśna 1991, s. 210). W tym opracowaniu karpa interpretowana jest jako system korzeniowy powalonego drzewa wyrwany z podłoża wraz z substancją mineralną i organiczną przylegającą do korzenia, następnie zdeponowaną na powierzchni stoku.



Ryc. 1. Przykład ilustrujący zagłębienie i kopiec (A) oraz karpe powalonego drzewa (B) (fot. A – A. Kacprzak, B – Ł. Pawlik)
Fig. 1. An example of mound and pit (A) and a root plate of fallen tree (B) (foto A – A. Kacprzak, B – Ł. Pawlik)

Tabela 1. Udział zniszczeń powodowanych przez wiatr
Table 1. The proportion of damage caused by wind

Wybrane źródła dokumentujące zniszczenia w drzewostanach spowodowane przez silny wiatr różnej genezy			
Autor	Dane z lat	Zasięg	Udział w całkowitej sumie zniszczeń
Brázdil (1998)	1963–1996	Czechy	61%
Schelhaas i in. (2003)	1950–2000	Europa Zachodnia i Środkowa	53%
Gardiner i in. (2010)	1950–2009	Europa	>50%

Źródło: opracowanie własne.

powalonych drzew, natomiast zagłębienia w miejscach zakorzenienia i wzrostu drzewa przed powaleniem. Tego typu formy mogą dochodzić nawet do 1 m wysokości (kopce), 1 m głębokości (zagłębienia) i średnicy kilku metrów, co w wyraźny sposób wpływa na zróżnicowanie i wzbogacenie podłoża lasu o dodatkowy element rzeźby. W przypadku lasów zagospodarowanych najczęściej nie notuje się podobnej mikrotopografii ze względu na fakt, że drzewa zostają ścięte jeszcze przed ich powaleniem. Jednocześnie z powodu całkowitej przebudowy drzewostanów sudeckich były dawniej i są nadal notowane poważne szkody w lasach przez czynniki biotyczne (przede wszystkich gradacje szkodników owadzych) oraz abiotyczne (np. Zoll 1962). Wśród czynników abiotycznych najbardziej niszczycielski okazuje się silny wiatr prowadzący do powstania rozległych wiatrowałów (Brázdil 1998, Schelhaas i in. 2003, Gardiner i in. 2010) (tab. 1). Jest on również czynnikiem najczęściej inicjującym proces saltacji wykrotowej (Schaetzl 1986).

Karpy zalegają w pobliżu zagłębienia, które zaczyna pełnić funkcję miejsca punktowej depozycji materiału organicznego (liści, igliwia, gałęzi) oraz materiału mineralnego zmywanego i osypującego się z bryły korzeniowej powalonego drzewa. Ten nowy element w topografii stoku oddziałuje na koncentrację i odpływ wód opadowych, akumulację śniegu oraz modyfikuje spływ powierzchniowy. W skrajnych przypadkach dochodzi do czasowej retencji powierzchniowej w misach zagłębień. W wyniku procesów degradacyjnych (erozji, splukiwania, ruchów masowych itd.) oraz rozkładu pnia i systemu korzeniowego drzewa dochodzi w ciągu kilku lub kilkunastu lat do uformowania się kopca w miejscu karpy (5–10 lat wg Schaetzl, Follmer 1990). Najczęściej zagłębienie nie zostaje całkowicie wypełnione, dlatego też w parze z kopcem tworzy formę diagnostyczną, pozwalającą na jej późniejsze rozpoznanie jako efekt procesu saltacji wykrotowej. W tak przyjętej interpretacji pomocne są również analizy profili glebowych i próbek pobranych z wydzielonych horyzontów glebowych w obrębie kopca i zagłębienia. W trakcie saltacji wykrotowej dochodzi do wymieszania osadów z poszczególnych horyzontów oraz odwrócenia lub przemieszczenia części profilu glebowego,

kiedy to na nienaruszony profil glebowy zostają nałożone poziomy głębsze, bardziej szkieletowe, wyniesione z miejsca wyrwania drzewa (Gerlach 1960, Schaetzl 1986). Według Schaetzla (1986) do całkowitego odwrócenia profilu glebowego może dojść tylko w przypadku szybkiego kolapsu bryły korzeniowej, np. w wyniku pożaru i wypalenia się pnia podtrzymującego karpę. Kolejnym dowodem wskazującym na proces saltacji wykrotowej, który można udokumentować podczas analizy profilu glebowego, są pogrzebane w kopcu resztki systemu korzeniowego w różnym stopniu rozkładu oraz zachowany kopalny poziom akumulacji organicznej (próchnicy, humusu). Ze względu na koncentrację części szkieletowych w wierzchnich horyzontach profilu glebowego kopca, forma ta jest o wiele bardziej odporna na procesy erozji i splukiwania, tym samym może manifestować się w rzeźbie stoku przez kilkaset do tysiąca lat, co stwierdzono na podstawie datowania metodą radiowęglową ^{14}C resztek organicznych pogrzebanych w kopcach (Schaetzl, Follmer 1990).

Należy podkreślić, że w historii badań znane są przypadki, kiedy mikrotopografię kopców i zagłębień interpretowano jako efekt procesów mrozowych zarówno plejstoceńskich (Embleton-Hamann 2004), jak i współczesnych (Dylikowa 1956). Obecnie proces saltacji wykrotowej rozpatrywany jest też jako jeden z ważniejszych elementów wietrzenia biomechanicznego wpływającego na heterogeniczność typów gleb w mikroskali (Phillips, Marion 2004, Šamonil i in. 2011), ich zmienną miąższość oraz główny mechanizm redystrybucji materiału glebowego w obrębie stoku (Gabet, Mudd 2010).

Zarys historii badań

Badania w Polsce

Saltacja wykrotowa w polskiej literaturze geomorfologicznej nie jest pojęciem nowym. Pierwszy opisał ją Gerlach (1960), analizując formy zagłębień i kopców ziemnych na Hali Długiej w Gorcach. Była to odpowiedź na artykuł Dylikowej (1956), w którym autorka interpretuje, jak się okazało błędnie, zastane formy jako efekt współczesnej kongeliflukcji. W opi-

nii Gerlacha (1960) reliktywne formy zagłębień i kopców ziemnych są efektem procesu saltacji wykrotowej. Kolejnym bardzo szczegółowym studium był artykuł Kotarby z 1970 r. Tym razem opisane zostały współczesne formy posaltacyjne w Tatrach w postaci karp powalonych drzew i zagłębień w miejscach ich wyrwania. Na temat saltacji wykrotowej pisali Prusinkiewicz i Kowalkowski (1964) oraz Brzozowski (1966). Wydaje się, że to właśnie Brzozowski pierwszy zwrócił uwagę na saltację wykrotową, pisząc o tzw. płatach krajobrazowych w dolinie Łopusznej w Gorcach, jako na istotny element aktywności geomorfologicznej w piętrze leśnym. Autor ten również pierwszy w polskiej literaturze geomorfologicznej użył pojęcia saltacja wykrotowa. Prusinkiewicz i Kowalkowski (1964) podczas badań gleboznawczych w Białowieskim Parku Narodowym obserwowali tzw. wykrociska, a w zagłębieniach wyróżnili „pseudogleje” powstające w efekcie przedłużającej się retencji wód.

W 1976 r. Gerlach, uwzględniając pierwsze w Polsce badania nad współczesnym tworzeniem się wykrotów drzew (Kotarba 1970), ponownie zwrócił uwagę na znaczenie saltacji wykrotowej w modelowaniu zalesionych stoków na obszarach górskich. Zniszczenia w lasach tatrzańskich opisywane w pracy A. Kotarby zostały również szczegółowo scharakteryzowane w pracy Bzowskiego i Dziewolskiego (1973). Ostatnio dokładne badania nad morfologicznym efektem silnego wiatru (w tym przypadku tzw. tatrzańskiej bory z listopada 2004 r.) przeprowadzono w Tatrach Słowackich (Dąbrowska 2009, Rojan 2010).

Badania na świecie

Od wielu lat zagadnienie saltacji wykrotowej, katastrofalnych wiatrowałów oraz powstawanie topografii kopców i zagłębień posaltacyjnych wzbudzało zainteresowanie badaczy z różnych dziedzin nauki tj.: botaniki (np. Faliński 1970), leśnictwa (Stephens 1956, Bruchwald, Dmyterko 2010), gleboznawstwa (Lyford, MacLean 1966) czy geomorfologii (Norman i in. 1995).

Wiatrowały i saltacja wykrotowa były wielokrotnie opisywane w Ameryce Północnej (por. Šamonil i in. 2010), szczególnie na obszarze NE wybrzeża Stanów Zjednoczonych. Pierwsza publikacja na ten temat pochodzi z 1939 r. (Lutz, Griswold 1939). Z 62 artykułów przeanalizowanych przez Šamonila i in. (2010) wynika, że najczęściej omawiana była morfologia wykrotowa (65%) oraz wpływ saltacji wykrotowej na procesy glebowe (66%), przy czym wiele prac poruszało oba te zagadnienia łącznie. Ostatnio bardzo szczegółowe badania gleboznawcze, z punktu widzenia wpływu saltacji wykrotowej na pedogenezę, zostały przeprowadzone w Czechach (np. Šamonil i in. 2010).

Badania w Sudetach

Badania nad saltacją wykrotową w Sudetach nie były, jak dotychczas, wykonywane szczegółowo, a nieliczne prace wskazywały raczej na kierunki dalszych badań niż rozwiązywały podstawowe problemy badawcze. Kwiatkowski (1969) zwrócił uwagę na cechy wiatrowałów ze względu na rzeźbę terenu, co pozwoliło wydzielić wiatrowały grzbietowe, stokowo-grzbietowe i zboczowe. Jedną z ważniejszych konkluzji wynikających z pracy W. Hasińskiego (1971) jest stwierdzenie, że obszary powiatrowałowe są bardziej zagrożone erozją i splukiwaniem, tym samym wartości denudacji w ich obrębie są większe niż na terenach całkowicie zalesionych. Autor ten dokonał także analizy epizodów silnego wiatru w Sudetach na podstawie dostępnych danych z nadleśnictw i Karkonoskiego Parku Narodowego (Hasiński 1977). Parzoch (2001) zwrócił uwagę na powszechność „obniżen i pagórów”, które w większym zagęszczeniu i rozprzestrzenieniu tworzą specyficzny mikrorelief stoku, nazwany przez niego morfologią wykrotową. Analizując jedno z zagłębień, określił tempo jego wypełniania na 6 mm rocznie, co pozwoliło mu na wyciągnięcie wniosków o intensywności powierzchniowych procesów degradacyjnych (erozji i splukiwania) po wiatrowale.

Wiatrowały w Sudetach

Szkody powodowane przede wszystkim przez czynniki atmosferyczne są w Sudetach bardzo częste. Od początku ich gospodarczego użytkowania lasy sudeckie były często niszczone przez huraganowe wiatry typu fen lub bora czy też przez wiatry genezy cyklonalnej związane z przemieszczaniem się nad Sudetami głębokich niżów barycznych, typowych dla chłodnej pory roku. Obszar Sudetów razem z Tatrami wskazywany jest jako najbardziej narażony na zniszczenia ze strony silnego wiatru, a literatura dotycząca tego problemu jest już bardzo bogata (np. Brázdil i in. 2004, Sobik, Błaś 2010).

Z tabeli 2 wynika, że w ostatnich 100 latach wystąpiły trzy epizody bardzo silnego wiatru, pociągające za sobą poważne szkody na terenie całych Sudetów polskich (w każdym przypadku szkody przekroczyły 1 mln m³ pozyskanego drewna). Również trzykrotnie zanotowano zdarzenia o mniejszej intensywności, takie, które spowodowały zniszczenia rzędu 0,5–0,7 mln m³ pozyskanego drewna. Na taki obraz nakładają się straty wynikające z innych zagrożeń abiotycznych, np. śniegołomów, straty coroczne związane z „wypadaniem” drzew z drzewostanu z powodu różnych czynników (np. dla Karkonoszy 1000–4000 m³ drzew rocznie; Borkowski, Konca 1985) oraz szkody powodowane przez czynniki biotyczne. Wynika z tego, że w przeciągu życia jednej ge-

Tabela 2. Zniszczenia w lasach sudeckich
Table 2. Damage in the Sudetic forests

Zniszczenia w lasach spowodowane przez silne wiatry w latach 1900–2011 w polskiej części Sudetów*					
Lp.	Rok	Lokalizacja	Masa drewna (mln m ³)	Pow. zniszczeń (ha)	Uwagi
1	1903	Sudety			szkody od wiatru i śniegu
2	1907	Sudety Zachodnie			
3	1909	Sudety			
4	1911	Sudety Wschodnie			katastrofalne szkody od wiatru
5	1913	Sudety			poważne szkody
6	1916				
7	1918				
8	1921 (XI)	Niecka Kłodzka	0,29		głównie nadleśnictwo Pokrzywno (0,13 mln m ³), prędkość wiatru do 23 ms ⁻¹
9	1923	G. Bystrzyckie i Orlickie	0,2	600	głównie nadleśnictwo Pokrzywno
10	1930	Sudety Środkowe	1,6		nadleśnictwo Lubawka (0,18 mln m ³), G. Kamienne, Orlickie, Bystrzyckie i Stołowe, w Czechach i na Słowacji 5 mln m ³ szkód
11	1931	Sudety Zachodnie			
12	1933	Sudety Środkowe	0,5		okolice Kłodzka
13	1942 (X)	Sudety			„groźne klęski żywiołowe”, „olbrzymie szkody o nieustalonym wymiarze” (Hasiński 1977), po stronie czeskiej Sudetów straty wyniosły ok. 5 mln m ³
14	1943				
15	1953	Sudety	0,16		
16	1955 (17.01)	Sudety Środkowe i Wschodnie	0,55	> 1200	głównie nadleśnictwa: Duszniki, Pokrzywno, Szczytna Śląska, Bystrzyca (w sumie 0,36 mln m ³), S część Kotliny Kłodzkiej, G. Bystrzyckie i Stołowe, prędkość wiatru do 33 ms ⁻¹
17	1957–1965	Sudety	0,12–0,22		przedział szkód notowanych corocznie
18	1962		0,13		„lasy kłodzkie” (Hasiński 1977)
19	1966 (4/5.11)		0,75		Karkonosze (65000 m ³ , 215 ha), nadleśnictwo Śnieżka (0,1 mln m ³), prędkość wiatru 40–50 ms ⁻¹
20	1966/1967		1,0		śniego- i wiatrołomy, nadleśnictwo Bystrzyca Kłodzka (0,15 mln m ³)
21	1968		0,14		
22	1969–1974		0,63		56% szkód powstało w Sudetach Zachodnich, a 36% w Sudetach Środkowych
23	1975		0,49	8350	nadleśnictwa sudeckie (na podstawie materiałów RDLP we Wrocławiu)
24	1976 (11–13.01)		0,12	6940	nadleśnictwo Kamienna Góra (0,06 mln m ³)
25	1977		0,07	8752	nadleśnictwa sudeckie (na podstawie materiałów RDLP we Wrocławiu)
26	1978				
27	1979		0,18	15211	
28	1980	Sudety	0,15	15230	

29	1981	Sudety	0,15	13830	
30	1982		0,13	8717	
31	1983		0,15	8458	
32	1984 (23–24.11)		0,13	10348	nadleśnictwo Świeradów (0,06 mln m ³)
33	1985			11576	nadleśnictwa sudeckie (na podstawie materiałów RDLP we Wrocławiu)
34	1986			9224	
35	2007		1,1		Karkonosze po stronie czeskiej (0,11 mln m ³) i polskiej (7000 m ³), prędkość wiatru do 70 ms ⁻¹
36	2008				

*zestawienie własne na podstawie dostępnej literatury i archiwum RDLP we Wrocławiu.

neracji drzew są one kilkakrotnie narażone na oddziaływanie czynników niszczących mających swoje konsekwencje w rozległych wiatrowałach i wiatrolomach. W takiej sytuacji proces saltacji wykrotowej nabiera szczególnego znaczenia, a opisywana częstotliwość wiatrowałów jest pośrednią przesłanką wskazującą na rangę tego procesu w grupie obserwowanych w piętrze leśnym Sudetów (por. Bieroński i in. 1992, Parzóch 2001).

Obszar badań szczegółowych

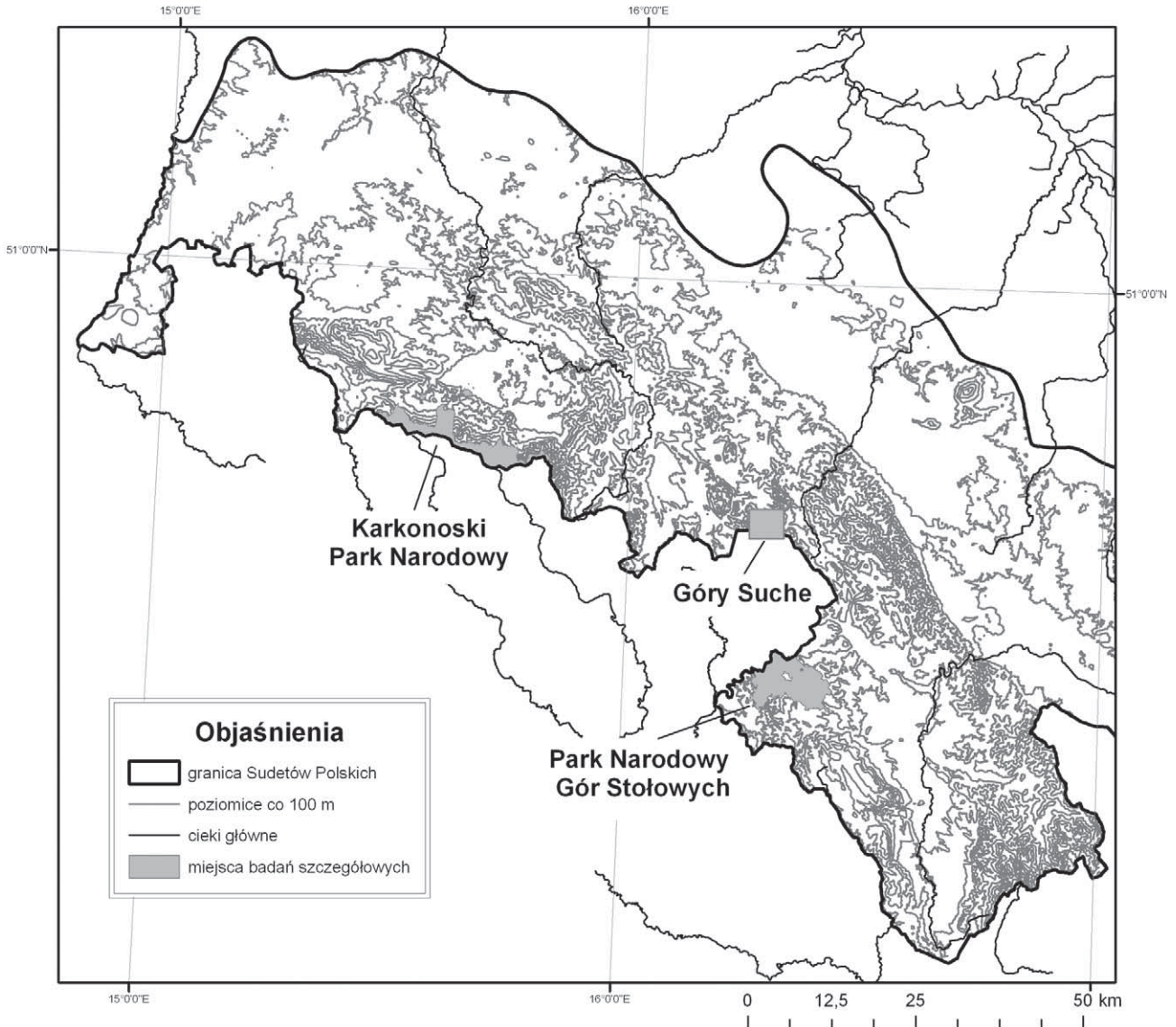
Obszar badań obejmuje zalesione stoki regla dolnego i górnego po polskiej stronie Sudetów. Obecnie

jest to przedział wysokościowy od granicy rolno-leśnej przebiegającej na wysokości 350–600 m n.p.m. (Migoń 2008a), do ekotonu górnej granicy lasu (w Karkonoszach pomiędzy 1036 a 1340 m n.p.m.) (Migoń, Parzóch 2008).

Do badań szczegółowych wybrano poligony w obrębie trzech masywów górskich (tab. 3, ryc. 2). Pierwszy poligon badawczy znajduje się w obrębie Sudetów Środkowych w Górach Suchych, które wchodzi w skład większej jednostki fizycznogeograficznej Gór Kamiennych. Obszar ten administrowany jest przez nadleśnictwo Wałbrzych. Kolejne dwa obszary znajdują się w Karkonoskim Parku Narodowym oraz Parku Narodowym Gór Stołowych. Wybrane cechy poligonów badawczych zostały podane w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyka poligonów badawczych
Table 3. The main features of study sites

Główne cechy	Stanowiska badawcze w Sudetach			
	Góry Suche	Park Narodowy Gór Stołowych (PNGS)	Karkonoski Park Narodowy (KPN)	
			Złoty Stok	Zbocze
Wysokość w m n.p.m.	700–868	600–760	1072–1138	1169–1187
Ekspozycja	N	SW	NW	N
Nachylenie stoków	15–40°	15–35°	15–30°	15–30°
Podłoże, geologia	tufy ryolitowe	mułowce wapieniste	granity porfirowate	
Gleby	brunatne	brunatne typowe	bielice właściwe	glejo-bielice właściwe
Typ drzewostanu	dolnoreglowa świerczyna sudecka	buczyna sudecka	górnoreglowa świerczyna sudecka (drzewostan jednopiętrowy)	
Gatunek dominujący (wiek, wysokość)	świerk (<i>Picea abies</i>)	buk (<i>Fagus sylvatica</i>)	świerk (89–114 lat; 18 m)	świerk (174–194 lata; 20 m)
Powierzchnia poligonu (ha)	6,2	2,3	3,5	5,7
Rodzaje form (współczesne, reliktowe)	współczesne powstałe podczas cyklonu Cyryl w 2007 r.	reliktowe nieznanego wieku	współczesne powstałe zarówno podczas cyklonu Cyryl w 2007 r., jak przed i po nim	



Ryc. 2. Obszar badań
Fig. 2. Study area

Metody badań

Za główną metodę badawczą przyjęto szczegółowe kartowanie geomorfologiczne. W terenie mierzono wymiary karp, zagłębień i kopców ziemnych za pomocą taśmy mierniczej, a ich względne położenie przy użyciu dalmierza laserowego (model TruPulse 200). Obliczenia objętości materiału mineralnego tkwiącego w karpie powalonego drzewa oraz elementów morfologii wykrotowej przeprowadzono według wzoru na półelipsoidę obrotową o trzech nierównych osiach (2) zaproponowanego przez Normana i in. (1995) (ryc. 3):

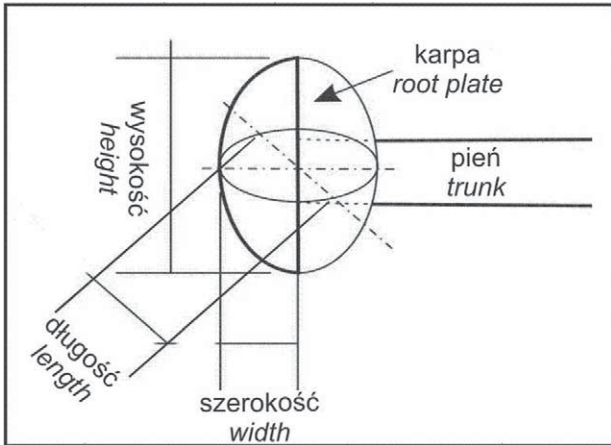
$$V = \frac{1}{2} \times \left(\frac{3}{4} \pi \left(\frac{h}{2} \times \frac{d}{2} \times a \right) \right), \quad (1)$$

$$V = \frac{\pi h d a}{6}, \quad (2)$$

gdzie: h to wysokość, d długość, a to szerokość karp zgodnie z ryciną 3.

Należy podkreślić, że w literaturze podawane są różne metody na obliczanie objętości materiału w karpie, jednakże najczęściej używane jest przybliżenie do półelipsoidy obrotowej. Jednocześnie taki sam wzór stosuje się do obliczania objętości kopców, wychodząc z założenia, że na stromych stokach tylko niewielka część materiału stokowego wraca do zagłębienia, tym samym teoretycznie odpowiada objętości karp (nie uwzględniając objętości masy drewna budującego system korzeniowy oraz późniejszych procesów degradacyjnych).

W celu oszacowania tempa degradacji materiału tkwiącego w karpach i tempa wypełniania zagłębień zainstalowano na poligonach badawczych w Karkonoszach sześć folii rozpiętych pod karpami tak, aby zakrywały powstałe zagłębienia. Próby gruntu zdeponowanego na folii pobierano od lipca do paździer-



Ryc. 3. Główne parametry karpki (porównaj z ryc. 1)

Fig. 3. The main parameters of a root plate (compare also with Fig. 1)

nika 2010 r. oraz od czerwca do sierpnia 2011 r. Dodatkowo dla oszacowania tempa spłukiwania powierzchniowego na obszarach powiatrowałowych w Karkonoskim Parku Narodowym zainstalowano cztery chwytacze (łapacze): dwa na powierzchni całkowitego wiatrowału, jeden na granicy wiatrowału–las oraz jeden w lesie z częściowym wiatrowałem.

Przeanalizowano również ortofotomapy wykonane dla Karkonoskiego Parku Narodowego w roku 2001 i 2008 (Ortofotomapy Pracowni GIS KPN). Na tej podstawie w środowisku ArcGIS zwektoryzowano pnie powalonych drzew w okolicach Mumławskiego Wierchu (1217 m n.p.m.) i między Doliną Łomniczki a Czarnym Grzbietem (ok. 1100 m n.p.m.). Następnie dla tak przyjętych obszarów testowych obliczono przeważający kierunek ich ułożenia (dla pni powyżej 10 m długości), korzystając ze wzoru na obliczanie azymutu ze współrzędnych (3) (Przewłocki 2009). Celem było przybliżenie głównego kierunku huraganowego wiatru niszczącego dany drzewostan.

$$\tan \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

We wzorze (3) x_1 i y_1 to współrzędne pierwszego punktu (początek wektora), a x_2 i y_2 to współrzędne drugiego punktu powalonego pnia drzewa (koniec wektora).

Rezultaty

Pomiary wielkości karpki i zagłębień

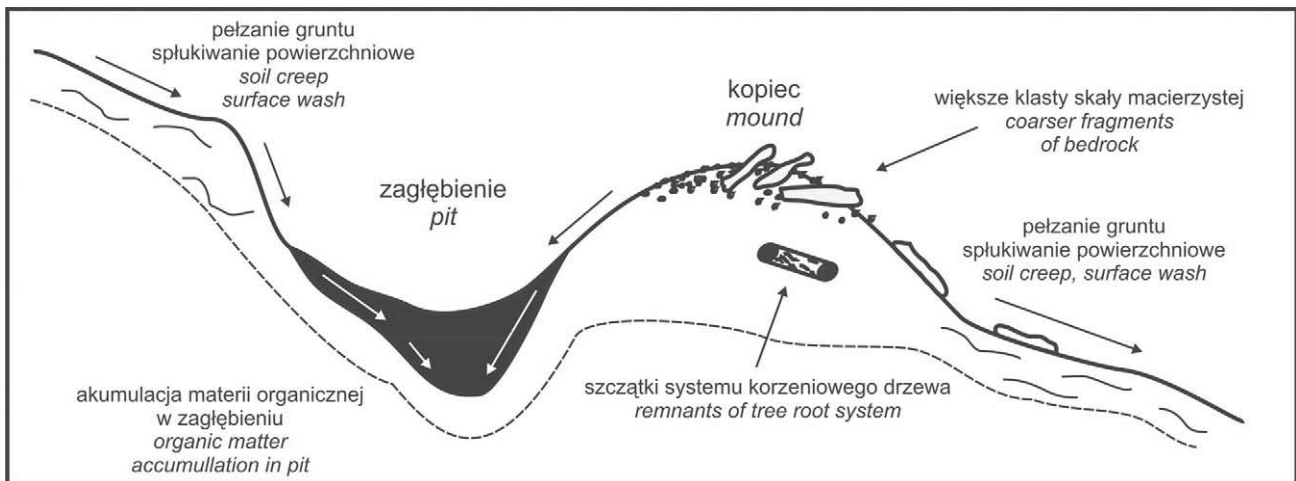
Pomiary wielkości karpki i zagłębień przeprowadzono podczas prac terenowych w Górach Suchych. Na wschód od miejscowości Sokołowsko powstał rozległy wiatrował spowodowany przejściem cyklo-

nu Cyryl w dniach 18–19.01.2007 r. (Borkacki 2007). Objął on między innymi wzniesienia Włostowej (903 m n.p.m.), Kostrzyny (891 m n.p.m.) i Czarnka (868 m n.p.m.). Na poligonie badawczym o powierzchni 6,2 ha pomierzono w sumie 197 karpki powalonych drzew, jednakże jedynie w 149 przypadkach udało się otrzymać wszystkie niezbędne do dalszych obliczeń wymiary. W obliczeniach nie uwzględniono wykrotów, które wizualnie oceniono na bardzo stare ($n=4$), przypuszczalnie powstałe przed cyklonem Cyryl w 2007 r. Niektóre z drzew były jedynie pochylone, tak więc bez możliwości pomiaru np. szerokości czy długości karpki. Możliwe, że jest to efekt odcięcia pnia i częściowego powrotu karpki do jej pierwotnej pozycji. Niestety takiej sytuacji nie można wykluczyć ze względu na późniejsze prace leśne w obrębie tego stoku. Średnia objętość karpki (V) wyniosła w przypadku tego poligonu 4 m^3 (dla $n=145$, min. 0,08; maks. 17,4; odchylenie standardowe wyniosło 3,2). Po odrzuceniu wartości skrajnych średnia objętość karpki wyniosła $3,95 \text{ m}^3$. Przy założeniu, że połowa materiału z karpki wraca do zagłębienia, powstałe w ten sposób kopce miałyby objętość rzędu ok. 2 m^3 . Biorąc pod uwagę przeliczone objętości karpki poszczególnych drzew, przemieszczenie masy skalnej określa się na $95 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($0,0095 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$, dla $V=4 \text{ m}^3$).

Materiał tkwiący w poszczególnych karpkach różnicuje się na trzy główne typy: gruzowy (38%), gruzowo-piaszczysty (28%) i piaszczysto-gruzowy (21%). Typ materiału oceniono wizualnie zgodnie z przeważającą frakcją materiału skalnego. W skrajnych przypadkach materiał mineralny w karpce składał się tylko z dużych okruchów spękaną skały. Korzenie świerka były w stanie tak głęboko wrosnąć w spękania, że w trakcie saltacji wykrotowej wyrwany został znaczny pakiet skały podłoża. Materiał frakcji gruzowej był najczęściej ostrokrawędzisty, łatwo osypujący się z systemów korzeniowych drzew, co umożliwiała tworzenie się niewielkich rozmiarów stożków usypiskowych poniżej karpki i jednoczesny transport w dół stoku. W niektórych sytuacjach fragmenty skalne zasypywały młode świerki rosnące poniżej. W wielu miejscach po wyrwaniu drzewa nie powstawało „typowe” zagłębienie o kształcie zbliżonym do elipsy, a rozległa powierzchnia naruszonej pokrywy stokowej o miąższości rzędu 20–40 cm, również z odstąpiętą w kilku przypadkach spękaną skałą podłoża. Taką sytuację zarejestrowano w 37 przypadkach, gdzie naruszona powierzchnia stoku dochodziła do średnio 11 m^2 .

Pomiary wielkości kopców i zagłębień

Pomiary wielkości kopców i zagłębień przeprowadzono na poligonie badawczym na stokach Rogowej Kopy w Parku Narodowym Gór Stołowych. Zarówno zagłębienia, jak i kopce są bardzo dobrze



Ryc. 4. Syntetyczny schemat kopca i zagłębienia
Fig. 4. A synthetic diagram of mound and pit

widoczne w morfologii stoku, wpływając na jego mozaikowość m.in. poprzez zwiększone amplitudy wysokości pomiędzy formami kopców i zagłębień a nieprzemodelowaną powierzchnią stoku. W mikroskali doszło tu do powstania schodkowego profilu na generalnie wypukłym stoku o nachyleniu rzędu 15–35°. Wiek form nie został jak dotychczas określony, jednakże na podstawie archiwalnych planów urządzenia lasu dla zlikwidowanego nadleśnictwa Duszniki można domniemywać, że drzewostan ten został zniszczony około 100 lat temu. Dla tak młodych form datowanie szczątków organicznych pogrzebanych w karpach wydaje się problematyczne (Walanus, Goslar 2009).

Stwierdzono, że średnia objętość zagłębień jest nieznacznie mniejsza od kopców i wynosi odpowiednio 1,6 i 1,7 m³. Wynika to między innymi z ciągłego obniżania kopców w efekcie oddziaływania czynników zewnętrznych (również pełznięcia gruntu) i zasypywania zagłębień materiałem mineralnym z wyższych partii stoku i w większym stopniu materia organiczną w postaci liści i gałęzi. Zapewne w trakcie degradacji karp powalonych drzew część materiału wróciła do zagłębienia. Wzajemne położenie obu form wskazuje na powalenie większości drzew w dół stoku. W większości przypadków powierzchnie kopców są wyraźnie przemyte przez wody opadowe z pozostałościami specyficznej „skorupy drobnogruzowej”, a niekiedy również z większymi fragmentami skalnymi o dłuższych krawędziach dochodzących nawet do 74 cm (średnio 26 cm). W skrajnych przypadkach fragmenty skalne wychodzą z wierzchołków kopców „w powietrze” (ryc. 4). Powierzchnia zajęta przez zagłębienia i kopce stanowi 4,7% całkowitej powierzchni poligonu badawczego.

Jednostkowe przypadki zaobserwowane w terenie wskazują na czasową retencję wód w zagłębieniach oraz zasiedlanie wnętrza kopców przez zwierzęta ryjące.

Pomiary tempa usuwania materiału z karp powalonych drzew

W literaturze udokumentowane zostały tylko nieliczne próby pomiaru tempa usuwania (denudacji) materiału glebowo-zwierzelinowego tkwiącego w korzeniach powalonych drzew. Nie została również, jak dotychczas, opracowana uniwersalna metoda pozwalająca na jednoznaczne oszacowanie ilości osadu deponowanego w zagłębieniach poniżej karp. Jedną z takich prób podjął Putz (1983) w lesie tropikalnym strefy równikowej na obszarze Panamy, stosując metalowe pale wbite w zagłębienia („*metal stakes driven into the bottom of pits*”). W ten sposób określono tempo wypełnienia zagłębień na 8 cm rok⁻¹, z zaznaczeniem, że akumulacja następuje szybciej w okresach wzmożonych opadów (Putz 1983). Podobną próbę wykonano w Karkonoszach, szacując tempo wypełnienia zagłębień na 6 mm rok⁻¹ (Parzoch 2001). W tym przypadku miąższość zakumulowanego materiału zmierzono tylko w jednym zagłębieniu.

W obecnych badaniach wykorzystano folie zainstalowane w sześciu zagłębieniach na poligonach badawczych na południe od Karpacza (Złoty Stok i Zbocze). Próbkę osadów zakumulowanych w foliach pobierano w interwałach czasowych rzędu 21–246 dni. Najdłuższy z nich spowodowany był przerwą okresu zimowo-wiosennego (od października do końca maja) i brakiem możliwości prowadzenia badań terenowych. W tym czasie masa pobranych prób wahała się od 2,0 g (po 244 dniach) do 61 g (po 91 dniach). Jedną z najniższych wartości określona została dla próbki pobranej po akumulacji w chłodnej porze roku (od 1.10.2010 do 1.06.2011), co może wskazywać na rolę pokrywy śnieżnej i zamarzania gruntu w hamowaniu tempa denudacji karp (brak splukiwania, osypywania).

Ilość zdeponowanego materiału w zagłębieniach zależy m.in. od cech brył korzeniowych i tkwiącego w

nich osadu (frakcji, stopnia jego kompaktacji, porowości itp.). Również pozycja zagłębień względem granicy las/wiatrował może wpływać na wartości opadu docierającego do dna lasu i tym samym na wielkość splukiwania i erozji. Dodatkowo powierzchnie karp niekiedy pokryte są porostami i roślinnością trawiastą. Obserwuje się także okapy darniowe, które osłaniają karp od góry bądź częściowo je pokrywają.

Wstępne obserwacje terenowe wskazują, że zastosowana metoda ma pewne ograniczenia. Ze względu na warunki klimatyczne w reglu górnym Karkonoszy niektóre fragmenty folii były pozawijane i przemieszczone, co jest efektem bardzo silnego wiatru, typowego dla tego piętra wysokościowego. W konsekwencji można przyjąć, że zmierzone wartości odzwierciedlają jedynie minimalne tempo degradacji brył korzeniowych powalonych drzew. W rzeczywistości może być ono znacznie większe. Ostatecznie masa próbek związana jest również z czasem rozpoczęcia pomiarów w stosunku do roku wystąpienia wiatrowału, tym samym ze stopniem zaawansowania degradacji danej bryły korzeniowej (cyklon Cyryl pojawił się w 2007 r., pomiar rozpoczęto w 2010 r.). Zakłada się, że tempo usuwania materiału mineralnego z karp nie ma charakteru liniowego w danej jednostce czasu. Najwięcej materiału usuwane jest tuż po powaleniu drzewa i wyeksponowaniu karp na czynniki zewnętrzne.

Innymi czynnikami, które wpływają na denudację materiału skalnego z brył korzeniowych, mogą być aktywność zwierząt, wzrost roślin (efekt wrastania korzeni), lód włóknisty, deflacja, niszczenie karp przez uderzenie sąsiedniego pnia w trakcie wiatrowału (podczas tego samego lub późniejszego epizodu wiatru), a także pożary lasów.

Na poligonie badawczym w Karkonoszach określono maksymalną i średnią wielkość materiału skalnego w karpach, zagłębieniach i foliach służących do zbierania materiału denudowanego z powierzchni brył korzeniowych. Fragmenty skalne w zagłębieniach mierzone były przed zainstalowaniem w nich folii. Folie rozmieszczone były na całej długości karp w jej najbliższym sąsiedztwie, przykrywając jednocześnie obszar zagłębienia. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wymiary fragmentów skalnych na poligonach w Karkonoszach (w cm). Wartości średnie i maksymalne oznaczają wymiary krawędzi mierzonych odłamków

Table 4. Dimensions of rock clasts (in cm) within research polygons in the Karkonosze Mts. Mean and maximum values indicate dimensions along edges of measured rock fragments

	Karpy	Zagłębienia	Folie
Wartość maks.	109-79-49	105-85-69	16-13-11
Średnie długości	54-35-20	49-32-17	7-5-3
liczba pomiarów	11	39	53

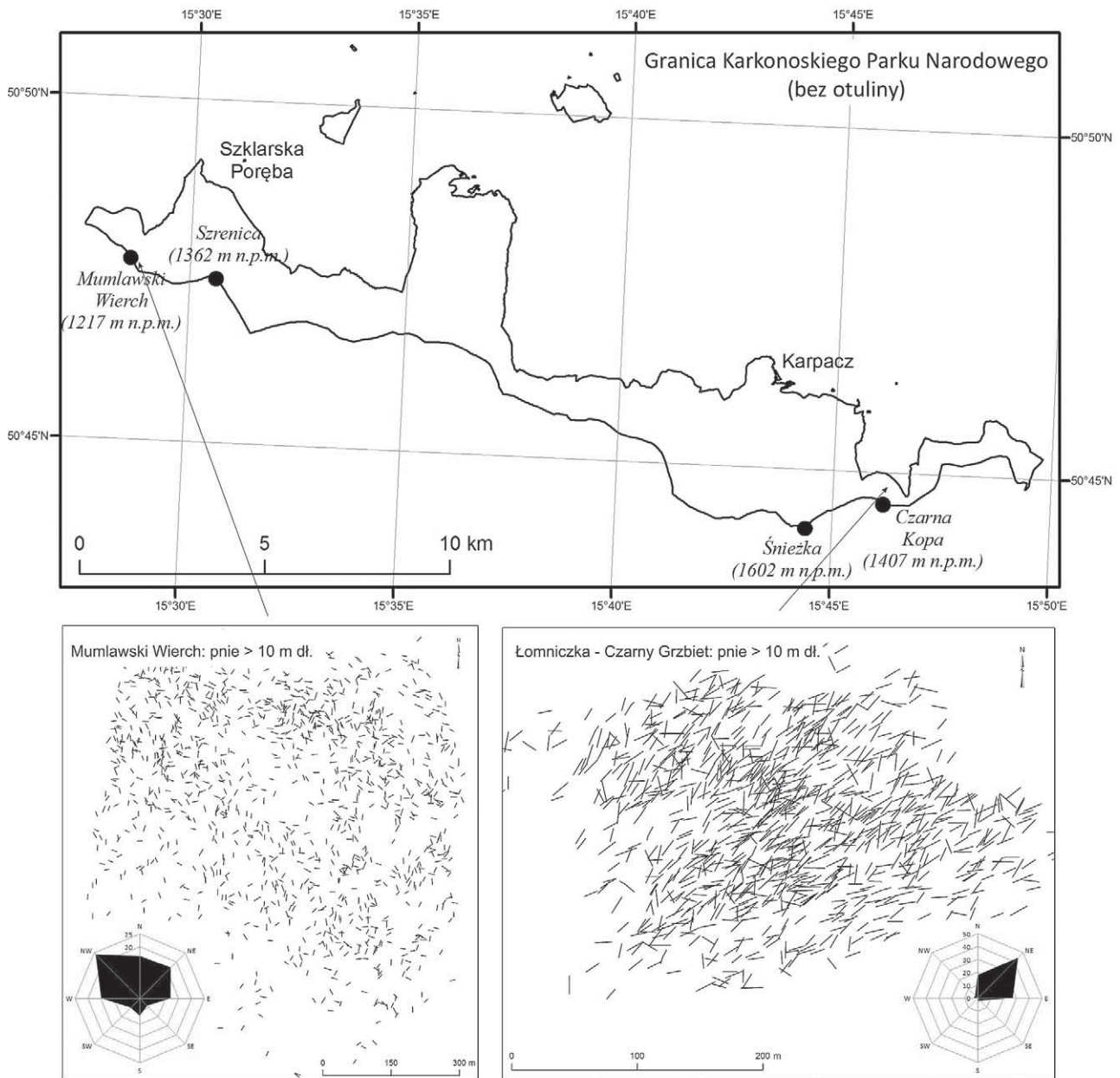
Powyższe dane dowodzą, że wyniesieniu w momencie powalenia drzewa ulegają nawet fragmenty frakcji blokowej. Mogą one być wystawione na działanie czynników zewnętrznych, tkwiąc w systemie korzeniowym powalonego drzewa 1–2 m nad powierzchnią gruntu kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt lat. Na taki długi okres wskazują obserwacje przeprowadzone na powierzchni wiatrowału z 1966 r. w Karkonoszach Zachodnich. Jednocześnie podobnej wielkości bloki skalne eksponowane były na działanie czynników zewnętrznych w zagłębieniach. Sytuacja taka występuje często na obszarze wiatrowałów. Na rolę drzew w procesie redystrybucji grubofrakcyjnego materiału na stokach zwrócono uwagę, przykładowo w Ameryce Północnej, już 50 lat temu (Lutz 1960).

Pomiary tempa splukiwania powierzchniowego

Badania prowadzone w różnych warunkach środowiskowych wskazują, że obszary wiatrowałów mogą być narażone na intensywne splukiwanie i erozję (Hasiński 1971, Klementowski 1996, Gerber i in. 2002, Rojan 2010). Aby ocenić wpływ procesu saltacji wykrotowej na zalesione stoki w Karkonoszach, zainstalowano cztery chwytacze (łapacze) na powierzchniach badawczych w obrębie stoków o różnych cechach. Na każdej powierzchni badawczej znajduje się bryła korzeniowa w różnym stopniu rozkładu. Najczęściej powierzchnia stoku ograniczona chwytaczem pokryta jest ściółką leśną, jednakże w jednym przypadku znaczny procent takiej powierzchni stanowi zagłębienie. Próby pobierano w interwałach od 1 do 8 miesięcy. We wszystkich przypadkach akumulowany był jedynie materiał organiczny (igłowie, gałązki) ze śladowymi ilościami materiału mineralnego. Np. w okresie od 1.06.2011 do 30.08.2011 r. z powierzchni ograniczonej przez chwytacz (18 m²) z jednym wykrotem zmyte zostało 66 g materiału, w większości materii organicznej. Zmierzone wartości materiału mineralnego w każdym przypadku nie przekroczyły 2 g. Jedynie lokalnie w obrębie niższych partii zagłębień posaltacyjnych obserwuje się akumulację materiału z wyraźną laminacją (osad o cechach deluwium stokowego).

Analiza ortofotomap

Analiza opiera się na ocenie zniszczeń udokumentowanych na bazie ortofotomap z roku 2001 i 2008 w obrębie poligonów badawczych w Karkonoszach (Złoty Stok, Zbocze). Wektoryzowano także pnie drzew na obszarach testowych przekształconych przez wiatrował (Mumławski Wierch i Dolina Łomniczki–Czarny Grzbiet) na podstawie ortofotomapy o rozdzielczości 15 cm z 2008 r. Analiza wektoryzowanych pni wykazała, że powalone pnie mogą charakteryzować się różnym ukierunkowaniem.



Ryc. 5. Obszary testowe Mumławski Wierch i Łomniczka–Czarny Grzbiet

Fig. 5. Test areas of Mumławski Wierch and Łomniczka–Czarny Grzbiet

Przykładowo część stoku między doliną Łomniczki a Czarnym Grzbietem w Karkonoszach Wschodnich (ryc. 5) pokryta jest pniami o wyraźnym ukierunkowaniu, gdzie 44% zwektoryzowanych pni powyżej 10 m długości (966 pni) zostało przewróconych w kierunku NE. Wskazują na to również obserwacje przeprowadzone w terenie.

W przypadku obszaru testowego w obrębie Mumławskiego Wierchu (ryc. 5) zwektoryzowane pnie powyżej 10 m długości (1235 pni) tworzą bardziej złożony obraz, pokazany na wykresie kierunków zalegania pni powalonych drzew (ryc. 5). 24% pni zostało powalonych bądź złamanych w kierunku NW, natomiast tylko 17% w kierunku NE.

Miejsca, w których zlokalizowano poligony badawcze na Złotym Stoku i Zbocz, znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie starszych wiatrowałów. Sytuacja ta jest pokazana na ortofotomapie z 2001 r. W takim przypadku ze względu na tzw. „efekt brzegowy” na granicy lasu drzewostan ten mógł być szczególnie narażony na zniszczenie. W konsekwencji uległ on naporowi wiatru w trakcie cyklonu Cyryl w 2007 r.

Dyskusja

Pożary, wiatrowały, gradacja szkodników owadzych czy nawet wycinanie drzew przez człowieka są

przykładami zakłóceń zewnętrznych (*allogenic disturbances*) pojedynczych drzew lub całych połąci drzewostanów. Zakłócenia wewnętrzne (*autogenic disturbances*) powodują obumarcie pojedynczych drzew z przyczyn zależnych od ich indywidualnych cech bądź charakteru samego ekosystemu leśnego (Linke i in. 2007). Każdy z tych czynników działa na środowisko leśne w różnym zakresie przestrzennym i czasowym, modyfikuje je, czego konsekwencją są m. in. dynamiczne zmiany w systemie geomorfologicznym: stokowym i dolinnym. Związane są z tym zarówno przekształcenia form rzeźby, jak i zmiany w intensywności i częstotliwości procesów geomorfologicznych. Dobrym tego przykładem jest akumulacja materiału drobnofrakcyjnego w dnach dolin rzecznych, zdenudowanego ze stoków w wyniku znacznego wylesienia Sudetów (np. Latocha 2007).

W Sudetach współczesne przekształcenia rzeźby w piętrze leśnym są najmniej intensywne ze wszystkich dziedzin geoeologicznych w obrębie tego górotworu. Ograniczone są najczęściej do form genezy antropogenicznej (dróg leśnych, szlaków zrywkowych), ale również powierzchni wiatrowałów (Migoń 2008a). Na potrzebę szczegółowej analizy tych ostatnich, głównie w środowisku gór średnich, jakimi są Sudety, wskazywano w literaturze już kilkakrotnie (np. Migoń 2008b, Pawlik 2009), także w kontekście zmian klimatycznych i wzrostu częstotliwości huraganowych wiatrów (Kundzewicz 2011).

Niewątpliwa stabilizacyjna funkcja roślinności, w tym przede wszystkim drzew, odgrywa zasadniczą rolę w minimalizowaniu wszelkich przejawów aktywności rzeźbotwórczej powierzchniowych procesów geomorfologicznych, np. ruchów masowych (Marston 2010). Z drugiej strony podkreśla się bardzo istotną rolę drzew w wietrzeniu biomechanicznym i procesach glebowych związanych z bioturbacjami (Gabet i in. 2003, Phillips, Marion 2004). Te dwa aspekty badań uzupełniają się i w tak przyjętym podejściu saltacja wykrotowa jawi się jako podstawowy proces morfogenetyczny w piętrach regła dolnego i górnego. Pogląd ten potwierdzają dane historyczne dotyczące wiatrowałów sudeckich, analiza ortofotomap oraz obserwacje terenowe.

Mimo że przedstawione wyniki badań terenowych nie pozwalają jeszcze na daleko posunięte uogólnienia i wnioski, chociażby ze względu na brak długoterminowych serii pomiarowych, to ograniczając ocenę dynamiki stoków zalesionych do ostatnich stu lat w kontekście zmian pohuraganowych wyrażonych masą pozyskanego drewna bądź powierzchnią zniszczonego drzewostanu (tab. 2), stwierdza się, że jest ona dość znaczna. Dodatkowo dochodzi do dużego przemieszczenia mas skalnych rzędu $95 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ($0,0095 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$) na podłożu zbudowanym z tufów ryolitowych. Dla porównania badania w Tatrach Słowackich wykazały przemieszczenie rzędu $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ (Dąbrowska 2009). W przypadku

form reliktowych w Górach Stołowych wartość przemieszczenia wyniosła $61 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ($0,006 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$) na stokach zbudowanych z mułowców wapnistych. Dane te należy uznać za minimalne ze względu na znaczny stopień denudacji zarówno form współczesnych, jak i reliktowych.

Niskie (często niemierzalne) wartości sflukiwania materiału mineralnego na stoku są przesłanką do stwierdzenia, że w większej skali (dużych części stoku, poligonu) proces ten na obszarach powiatrowałowych nie ma istotnego znaczenia. Teza ta, jak na razie, odnosi się jedynie do Karkonoszy. Jednakże w obrębie niższych partii zagłębień posaltacyjnych obserwuje się akumulację materiału z wyraźną laminacją (osad o cechach deluwium stokowego). Mimo znacznego naruszenia ciągłości powierzchni stoku w trakcie saltacji wykrotowej jedynie punktowo dochodzi do zdercia ściółki leśnej, która na terenach nienaruszonych, pomiędzy wykrotami drzew, może nadal całkowicie hamować erozję i sflukiwanie.

Ogólnie rzecz biorąc, podczas saltacji wykrotowej dochodzi do lokalnego przemieszczenia mas skalnych, jednak w dłuższej perspektywie czasowej proces ten jest składową ogólnego transferu materiału glebowo-zwietrzelinowego w rozumieniu Kotarby i Migonia (2010). W tym przypadku mamy do czynienia z powolnym transferem, na który składa się wiele epizodów gwałtownego, ale krótkiego transportu w trakcie wiatrowału.

Podsumowanie

Przekształcenia powierzchni stokowych w Sudetach przez proces saltacji wykrotowej polegają przede wszystkim na wzbogaceniu mikrotopografii stoku o nowy element rzeźby, jakimi są zagłębienia w miejscach powalonych drzew. Ponieważ w Sudetach dominują lasy gospodarcze, drzewa usuwane są jeszcze przed powaleniem, a w przypadku rozległego wiatrowału rozpoczynają się prace sanitarne i pozyskiwanie zniszczonych drzew tuż po takim zdarzeniu. W ten sposób naturalny proces tworzenia się kopców w miejscach karp zostaje zahamowany. Wydaje się, że w Sudetach tylko w rzadkich przypadkach dochodzi do rozwoju mikroreliefu typu zagłębień i kopców (*pit-and-mound topography*), tak jak to miało miejsce na stromych stokach Rogowej Kopy w Parku Narodowym Gór Stołowych. Jednocześnie karpy są nośnikiem materii, która w dużej ilości ulega gwałtownemu transportowi. Jest to jednak dopiero pierwszy etap transportu, ponieważ z tak wyniesionego systemu korzeniowego materiał jest następnie wymywany, wywiewany, grawitacyjnie wraca do zagłębienia lub jest transportowany dalej w dół stoku.

Sumarycznym efektem procesu saltacji wykrotowej w skali pojedynczego stoku jest dodatkowa cecha w postaci zwiększonej szorstkości podłoża, co może

mieć wpływ na hydrologię stoku zalesionego w ogólności. W przypadku świeżych form powstałych po wyrwaniu drzew, jak również form reliktowych, zagłębienia odgrywają rolę punktów koncentracji wód stokowych i materiału przez nie transportowanego. W ten sposób dochodzi do znacznie szybszego zasilenia poziomu wód gruntowych. Inaczej sytuacja wygląda na powierzchniach zadarnionych, np. w Karkonoszach, gdzie splukiwanie powierzchniowe na odsłoniętych powierzchniach powiatrowałowych jest nadal hamowane. Mimo punktowego naruszenia ciągłości ściółki leśnej i odsłonięcia mineralnych poziomów pokryw stokowych większa powierzchnia stoku jest ciągle chroniona, a zagłębienia i karpys są szybko pokrywane przez roślinność trawiastą i mchy.

Wnioski

Badania nad procesem saltacji wykrotowej powinny objąć zarówno formy współczesne, jak i reliktowe. Takie podejście musi uwzględniać skalę przestrzenną zjawiska oraz jego rozpiętość czasową (częstotliwość i potencjalną aktywność w przeciągu całego holocenu). Biotyczne komponenty środowiska leśnego (głównie drzewa) w połączeniu z czynnikami abiotycznymi bardzo wyraźnie wpływają na dynamikę całego ekosystemu, co z kolei ma swoje odbicie m.in. w systemie geomorfologicznym. Takie spojrzenie nie pozwala na dość jednoznaczną ocenę piętra leśnego jako nie przejawiającego żadnej aktywności morfogenetycznej – z czym *implicite* można spotkać się w literaturze. Należy zauważyć, że efektem saltacji wykrotowej jest nie tylko forma rzeźby terenu, ale bezpośrednia i pośrednia modyfikacja odpływu wody ze stoku, procesów pedogenezy oraz regeneracji siedliska leśnego. Rozpatrywanie zatem efektów saltacji wykrotowej w oderwaniu od innych istotnych zmian na zalesionym stoku nie tłumaczy innych kluczowych problemów z tym związanych.

Podziękowania

Chciałbym w tym miejscu podziękować Prof. Piotrowi Migoniowi oraz anonimowemu Recenzentowi za wszelkie uwagi, które wzbogaciły ostateczną wersję artykułu. Badania prowadzone były w ramach grantu MNiSW: NN 306032940 (2011–2014), a także częściowo finansowane przez Zakład Geomorfologii w ramach dotacji statutowej w latach 2009–2010.

Literatura

Bieroński J., Chmal H., Czerwiński J., Klementowski J., Traczyk A., 1992. Współczesna denudacja w górskich zlewniach Karkonoszy. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 155: 151–169.

- Borkacki R., 2007. Szaleństwa „Cyryla”. *Echa Leśne* 3/27.
- Borkowski A., Konca B., 1985. Działalność Karkonoskiego Parku Narodowego w latach 1959–1984. *Rocznik Jeleniogórski* 33: 133–152.
- Brázdil R., 1998. Meteorological extremes and their impacts on forests in the Czech Republic. W: M. Beniston, J.L. Innes (red.), *The impacts of Climate Variability on Forests*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 19–47.
- Brázdil R., Dobrovolný P., Štekl J., Kotysa O., Valášek H., Jež J., 2004. History of weather and climate in the Czech Lands. VI. Strong winds. Masaryk University, Brno.
- Bruchwald A., Dmyterko E., 2010. Metoda określenia ryzyka uszkodzenia drzewostanu przez wiatr. *Leśne Prace Badawcze* 71, 2: 165–173.
- Brzozowski S., 1966. Beskidy Zachodnie (450.4). W: J. Kondracki (red.), *Symposium w sprawie regionalizacji fizycznogeograficznej Polski i krajów sąsiednich*. Przewodnik wycieczki PTG. Warszawa: 17–19.
- Bzowski M., Dziewolski J., 1973. Zniszczenia w lasach Tatrzańskich Parku Narodowego spowodowane przez wiatr halny wiosną 1968 r. *Ochrona Przyrody* 38: 115–153.
- Dąbrowska K., 2009. The morphogenetic impact of the bora type wind (19th November 2004) on the relief of Danielov dom area (The High Tatras). *Landform Analysis* 11: 5–10.
- Dylikowa A., 1956. Formes contemporaines du type congélifluctif sur le Turbacz (Gorce – Carpathes). *Biuletyn Peryglacjalny* 4: 339–344.
- Embleton-Hamann C., 2004. Processes responsible for the development of a pit and mound micro-relief. *Catena* 57: 175–188.
- Faliński J.B., 1978. Uprooted trees, their distribution and influence in the primeval forest biotope. *Vegetatio (obecnie Plant Ecology)* 38(3): 175–183.
- Gabet E.J., Reichman O.J., Seabloom E.W., 2003. The effect of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 31: 249–273.
- Gabet E.J., Mudd S.M., 2010. Bedrock erosion by root fracture and tree throw: A coupled biogeomorphic model to explore the humped soil production function and the persistence of hillslope soils. *Journal of Geophysical Research* 115, F04005, doi: 10.1029/2009JF001526.
- Gardiner B., Blennow K., Carnus J.M., Fleischner P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.L., Reviron M.P., Schelhaas M., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T., 2010. Destructive storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to European Commission – DG Environment, Joensuu, Finland: European Forest Institute. Online 08.02.2011 – <http://ec.europa.eu/>

- environment/forests/pdf/STORMS%20Final_Report_main_text%20(141210b).pdf.
- Gerber W., Rickli Ch., Graf F., 2002. Surface erosion in cleared and uncleared mountain windthrow sites. *Forest Snow and Landscape Research* 77, 1/2: 109–116.
- Gerlach T., 1960. W sprawie genezy kopczyków ziemnych na Hali Długiej w Gorcach. *Przegląd Geograficzny* 32, 1–2: 86–93.
- Gerlach T., 1976. Współczesny rozwój stoków w Polskich Karpatach Fliszowych. *Prace Geograficzne* 122. IGiPZ, PAN.
- Hasiński W., 1971. Wpływ wiatrołomów karkonoskich na przebieg denudacji. *Czasopismo Geograficzne* 41, 3: 301–303.
- Hasiński W., 1977. Szkody atmosferyczne w lasach Sudetów. *Czasopismo Geograficzne* 48: 451–455.
- Klementowski J., 1996. Degradacja pokryw stokowych w warunkach antropopresji. Procesy kriogeniczne, spłukiwanie i erozja żłobinowa. W: A. Jahn, S. Kozłowski, M. Pulina (red.), *Masyw Śnieżnika – zmiany w środowisku przyrodniczym*. PAE, Wrocław: 122–142.
- Klimaszewski M., 1981. *Geomorfologia*. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Kotarba A., 1970. The morphogenetic role of foehn wind in the Tatra Mts. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* 4: 171–187.
- Kotarba A., 2002. Współczesne przemiany przyrody nieożywionej w Tatrzańskim Parku Narodowym. W: W. Borowiec, A. Kotarba, A. Kownacki, Z. Krzan, Z. Mirek (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr*. TPN, PTPNoZ, Oddz. w Krakowie, Kraków–Zakopane: 13–19.
- Kotarba A., Migoń P., 2010. Góry wysokie a góry średnie Europy – spojrzenie geomorfologa. *Czasopismo Geograficzne* 81(1–2): 3–19.
- Kundzewicz Z.W., 2011. Zmiany klimatu, ich przyczyny i skutki – obserwacje i projekcje. *Landform Analysis* 15: 39–49.
- Kwiatkowski J., 1969. Klimatologiczna geneza wyłomów leśnych w Karkonoszach. *Czasopismo Geograficzne* 40, 3: 365–373.
- Latocha A., 2007. Przemiany środowiska przyrodniczego w Sudetach Wschodnich w warunkach antropopresji. *Acta Universitatis Wratislaviensis* 3007, *Studia Geograficzne* 80.
- Liechty H.O., Jurgensen M.F., Mroz G.D., Gale M.R., 1997. Pit and mound topography and its influence on storage of carbon, nitrogen, and organic matter within an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 1992–1997.
- Linke J., Betts M.G., Lavigne M.B., Franklin S.E., 2007. Introduction: structure, function, and change of forest landscape. W: M.A. Wulder, S.E. Franklin (red.), *Understanding forest disturbance and spatial pattern*. Remote sensing and GIS approaches. Taylor&Francis, Boca Raton, London, New York: 1–29.
- Lutz H.J., 1960. Movement of rocks by uprooting of forest trees. *American Journal of Science* 258: 752–756.
- Lutz H.J., Griswold F.S., 1939. The influence of tree roots on soil morphology. *American Journal of Science* 237: 389–400.
- Lyford W.H., MacLean D.W., 1966. Mound and pit microrelief in relation to soil disturbance and tree distribution in New Brunswick, Canada. *Harvard Forest Paper* 15: 1–18.
- Mała encyklopedia leśna, 1991. S. Kocięcki, A. Zdanowski, A. Kolk, S. Rzadkowski, R. Sobczak (red.). PWN, Warszawa.
- Marston R.A., 2010. Geomorphology and vegetation on hillslopes: Interactions, dependencies, and feedback loops. *Geomorphology* 116: 206–217.
- Migoń P., 2008a. Współczesna ewolucja rzeźby Sudetów i ich Przedgórze. W: L. Starkel, A. Kostrzewski, A. Kotarba, K. Krzemień (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. SGP, IGiPZ UJ, IGiPZ PAN, Kraków: 135–163.
- Migoń P., 2008b. Holocenska i współczesna morfogeneza stoków sudeckich. W: A. Traczyk (red.), *Geomorfologia Sudetów*. Stan badań i perspektywy. I Polsko-Czeskie Seminarium Geomorfologiczne, Sokołowsko, 16–17.10.2008: 43–48.
- Migoń P., Parzóch K., 2008. Geomorfologiczne uwarunkowania przebiegu górnej granicy lasu w Karkonoszach Polskich. W: A. Mazur, A. Raj, R. Knapik (red.), *Monitoring ekosystemów leśnych w Karkonoskim Parku Narodowym*. KPN, Jelenia Góra: 29–38.
- Norman S.A., Schaetzl R.J., Small T.W., 1995. Effects of slope angle on mass movement by tree uprooting. *Geomorphology* 14: 19–27.
- Parzóch K., 2001. Współczesne procesy geomorfologiczne w Karkonoszach w warunkach antropopresji. Maszynopis pracy doktorskiej. Archiwum Zakładu Geomorfologii IGiRR, Uniwersytet Wrocławski.
- Parzóch K., Migoń P., Szymanowski R., 2008. Współczesne procesy geomorfologiczne w ekotonie górnej granicy lasu w Karkonoszach Polskich. W: A. Mazur, A. Raj, R. Knapik (red.), *Monitoring ekosystemów leśnych w Karkonoskim Parku Narodowym*. KPN, Jelenia Góra: 39–55.
- Pawlik Ł., 2009. Znaczenie saltacji wykrotowej w kształtowaniu rzeźby stoku. *Czasopismo Geograficzne* 80(3): 130–146.
- Phillips J.D., 2009. Biological energy in landscape evolution. *American Journal of Science* 309: 271–289.
- Phillips J.D., Marion D.A., 2004. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma* 124: 73–89.

- Prusinkiewicz Z., Kowalkowski A., 1964. Studia gleboznawcze w Białowieskim Parku Narodowym. *Roczniki Gleboznawcze* 15, 2: 161–305.
- Przewłocki S., 2009. *Geomatyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Putz F.E., 1983. Treefall pits and mounds, buried seeds, and the importance of soil disturbance to pioneer trees on Barro Colorado Island. *Panaman. Ecology* 64(5): 1069–1074.
- Rączkowska Z., 2008. Współczesna ewolucja rzeźby Tatr. W: L. Starkel, A. Kostrzewski, A. Kotarba, K. Krzemień (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. SGP, IGiGP UJ, IGiPZ PAN, Kraków: 35–56.
- Rojan E., 2010. Rola bardzo silnego wiatru w przekształcaniu rzeźby terenu w piętrze leśnym gór, na przykładzie wiatrowału w słowackich Tatrach Wysokich. *Czasopismo Geograficzne* 81(1–2): 103–123.
- Schaetzl R.J., 1986. Complete soil profile inversion by tree uprooting. *Physical Geography* 7: 181–189.
- Schaetzl R.J., Follmer L.R., 1990. Longevity of treethrow microtopography: implications for mass wasting. *Geomorphology* 3: 113–123.
- Schaetzl R.J., Anderson S., 2005. *Soils: genesis and geomorphology*. Cambridge University Press.
- Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Schuck A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9: 1620–1633.
- Sobik M., Błaś M., 2010. Wyjątkowe zdarzenia meteorologiczne. W: P. Migoń (red.), *Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki*. *Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski* 14: 35–80.
- Stephens E.P., 1956. The uprooting of trees: a forest process. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20: 113–116.
- Šamonil P., Král K., Hort L., 2010. The role of tree uprooting in soil formation: A critical literature review. *Geoderma* 157: 65–79.
- Šamonil P., Tejnecký V., Borůvka L., Šebková B., Janík D., Šebek O., 2010. The role of tree uprooting in Cambisol development. *Geoderma* 159: 83–98.
- Šamonil P., Valtera M., Bek S., Šebková B., Vrška T., Houška J., 2011. Soil variability through spatial scales in a permanently disturbed natural spruce-fir-beech forest. *European Journal of Forest Research* DOI: 10.1007/s10342-011-0496-2.
- Walanus A., Goslar T., 2009. *Datowanie radiowęglowe*. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Zoll T., 1962. Analiza stanu lasów sudeckich. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych* 37: 123–144.