

Zapis dynamiki procesów osuwiskowych w przyrostach rocznych korzeni jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) – przykład z Pogórza Karpackiego

Anna Zielonka, Bartłomiej Oleszko, Ewa Juszcak,
Dominika Wrońska-Wałach

Abstrakt. Celem badań było rozpoznanie czasowej i przestrzennej aktywności procesów osuwiskowych z zastosowaniem analizy zmian anatomicznych w korzeniach jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.). Ponadto określono zależności między warunkami opadowymi a odnotowanym procesem osuwania. Badania wykonano na niewielkim osuwisku o powierzchni 0,14 ha zlokalizowanym na terenie Pogórza Wiśnickiego, w obrębie płaszczowiny podśląskiej zbudowanej z fliszu karpackiego. Analizie poddano pionowo rosnące korzenie odsłonięte na krawędzi skarpy osuwiskowej. Pomiarów anatomicznych drewna były wykonywane w programie WinCELL Pro (Regent). Stwierdzono przydatność w analizach procesów osuwiskowych zastosowania różnych wskaźników zmian anatomicznych. Wykazano zależność aktywności osuwiska z różnymi typami opadów w latach 1970, 1974, 1989, 1997 i 2010.

Słowa kluczowe: procesy osuwiskowe, dendrogeomorfologia, Pogórze Karpackie, anatomia drewna, odsłanianie korzeni

Abstract. Record of the landslide processes in annual growth of Silver fir (*Abies alba* Mill.) roots – example from the Carpathian Foothills. The aim of the research was to detect the landslide activity by means of analysis of wood anatomy of exposed silver fir roots. Additionally we analysed relation between precipitation and landslide activity. The research was carried out on a small landslide (0.14 ha) located in the Wiślickie Foothills within the Podślaska Nappe built of flysch rocks. Vertical roots exposed on the edge of landslide niche were taken under consideration. Wood anatomy changes were analyzed in WinCELL Pro software (Regent). It was concluded that spatial activity of landslides require analysis of different wood anatomy indicators. The relation between the landslide activity and different type of precipitation was revealed for 1970, 1974, 1989, 1997 and 2010.

Key words: landslide processes, dendrogeomorphology, Carpathian Foothills, wood anatomy, root exposure

Wstęp

Procesom osuwiskowym, ze względu na ich dużą aktywność w Polsce południowej, poświęca się ostatnio dużo uwagi. Rozpoznanie i monitorowanie osuwisk aktywnych i okresowo aktywnych jest współcześnie jednym z najważniejszych zadań, które Ministerstwo Środowiska

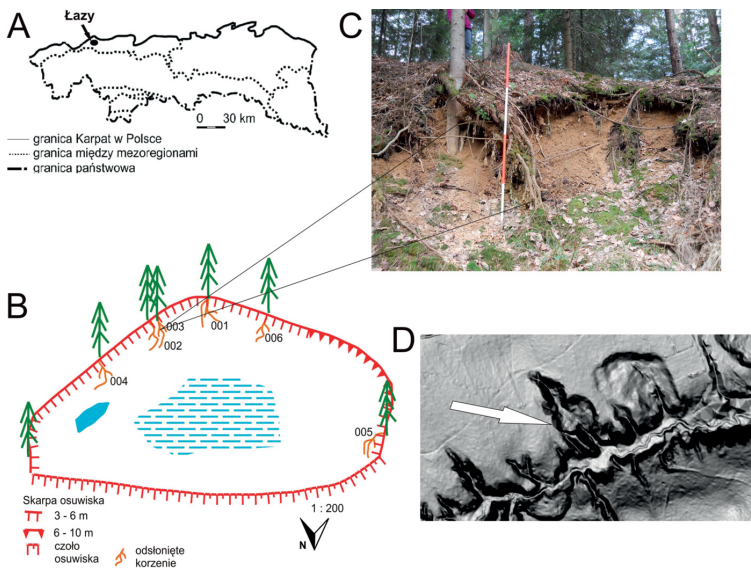
nakłada na Państwowy Instytut Geologiczny. W związku z koniecznością rejestracji przestrzennego rozmieszczenia osuwisk o różnym stopniu aktywności wdrożony został w życie projekt System Osłony Przeciwośuwiskowej. W obszarach pokrytych lasem aktywne i okresowo aktywne osuwiska mogą powodować duże straty materialne w gospodarce leśnej. Dlatego też monitoring aktywności i kierunku rozwoju osuwisk leśnych ma nie tylko znaczenie poznawcze, ale również praktyczne.

Metoda dendrogeomorfologiczna znajduje zastosowanie w badaniach różnych procesów morfogenetycznych, takich jak spływy torencjalne, spływy gruzowe (Ruiz-Villanueva i in. 2010), erozja fluwialna (Malik i Ciszewski 2008), migracja wydym nadmorskich (Koprowski i in. 2010) czy erozja wąwozowa (Hupp 1986; Vanderkerckhove i in. 2001). Jest ona również wykorzystywana w analizach wieku i dynamiki osuwisk (Alestalo 1971; Shroder 1980; Krąpiec i Margielewski 2000; Buchwał i Winowski 2009; Wistuba i Malik 2011). Proces osuwania generuje stres mechaniczny, który jest zapisywany w pniach drzew w postaci dekoncentrycznych przyrostów radialnych oraz zmian anatomicznych polegających na wytworzeniu drewna reakcyjnego (Shroder 1980; Mattheck 1991; Kojas i in. 2012). Aktywność procesów osuwiskowych może prowadzić również do odsłaniania korzeni. Są one wiarygodnym źródłem informacji dotyczących przestrzennej i czasowej aktywności procesów geomorfologicznych (Gärtner i in. 2001; Malik 2006, 2008; Gärtner 2007; Buchwał 2008; Wrońska-Wałach 2009). Na podstawie zmian anatomicznych w korzeniach możliwe jest datowanie zdarzeń i procesów o różnym natężeniu i częstotliwości występowania (Bodoque i in. 2005, 2011; Pelfini i Santilli 2006; Pérez-Rodríques i in. 2007; Buchwał 2008; Rubiales i in. 2008; Corona i in. 2011; Saez i in. 2011). Zmiany powierzchni światła komórek drewna wczesnego, procentowej zawartości drewna późnego oraz szerokości przyrostów rocznych w korzeniach odsłoniętych na działanie czynników zewnętrznych są jednak stosowane głównie w analizie procesów erozyjnych (Corona i in. 2011; Saez i in. 2011; Ballesteros-Cánovas i in. 2013; Wrońska-Wałach 2014).

Celem badań było sprawdzenie przydatności anatomii drewna odsłoniętych korzeni w rozpoznaniu dynamiki osuwisk. Założono, że zmiany wskaźników anatomicznych obliczonych dla odsłoniętych korzeni powinny wystąpić w 2010/2011 roku, czyli w roku uaktywnienia osuwiska. Ponadto podjęto próbę określenia zależności pomiędzy warunkami opadowymi a procesem osuwania.

Obszar badań

Obszar badań położony jest w zlewni potoku Stara Rzeka na Pogórzu Wiśnickim (49°56'47.95"N, 20°30'21.3"E, 285 m n.p.m). Teren ten leży w obrębie płaszczowiny podśląskiej zbudowanej z fliszu karpackiego przykrytej pyłami lessopodobnymi. Badana zlewnia cechuje się dojrzałą rzeźbą fluwialno-denuwacyjną (Świechowicz 1991) z powszechnie występującymi ruchami masowymi. Stanowisko, z którego pobrano próbki, położone jest w górnej zalesionej części zlewni. Obszar porośnięty jest przez las mieszany (*Pinus-Quercetum* typicum wariant z *Fagus sylvatica*) (Stachurska 1995). Dominującymi gatunkami na stanowisku badawczym są jodła (*Abies alba* Mill.) i buk (*Fagus sylvatica*). Analizowane osuwisko leży na południowym stoku grzbietu o przebiegu NE-SW. Znajduje się ono na wysokości 280–288 m n.p.m. W obrębie osuwiska wyróżniono skarpe o długości 68 m i o maksymalnej wysokości 8 m. Czoło osuwiska nasunęło się w obręb koryta potoku, wstrzymując jego przepływ (ryc. 1).



Ryc. 1. Obszar badań (001-006 – symbole pobranych korzeni)

A – położenie stanowiska badań w Karpatach Polskich, B – szkic rzeźby wraz z lokalizacją pobranych korzeni, C – skarpa osuwiskowa, D – obszar badań – numeryczny model terenu

Fig. 1. Study area (001-006 – roots ID)

A – location of site in Polish Carpathians, B – outline of landslide together with analyzed roots, C – landslide scarp, D – study area – digital elevation model

Material i metody

Badania dendrogeomorfologiczne prowadzono w kwietniu i grudniu 2013 roku na osuwisku, które zostało uaktywnione w 2010 roku. Aktywność osuwiska analizowano, wykorzystując pionowo rosnące, odsłonięte na krawędzi skarpy osuwiskowej korzenie jodły (*Abies alba* Mill.). Próby zostały pobrane w różnych częściach skarpy osuwiskowej. Przy poborze uwzględniono przestrzenne zróżnicowanie dynamiki badanego osuwiska (ryc. 1). Wycinki z korzeni o długości 50–60 cm pobrane zostały w odległości większej niż 1 m od pnia, tak aby wyeliminować zmiany anatomiczne w korzeniu związane ze stabilizacją pnia oraz zminimalizować obecność przyrostów fałszywych (Fayle 1968, 1975; LaMarche 1968). Aby sprawdzić zależności w przyrostach rocznych związanych z odległością korzenia od powierzchni, z jednego korzenia pobrano 2 do 3 prób z różnych głębokości. Z całych przekrojów poprzecznych korzeni przy użyciu Microtomu GSL 1 zostały ścięte próby mikroskopowe o grubości 15–20 μm . Kolejnym etapem w przygotowaniu korzeni było barwienie, czyszczenie oraz utrwalanie zgodnie z procedurą zaproponowaną przez Schweingruber (1990).

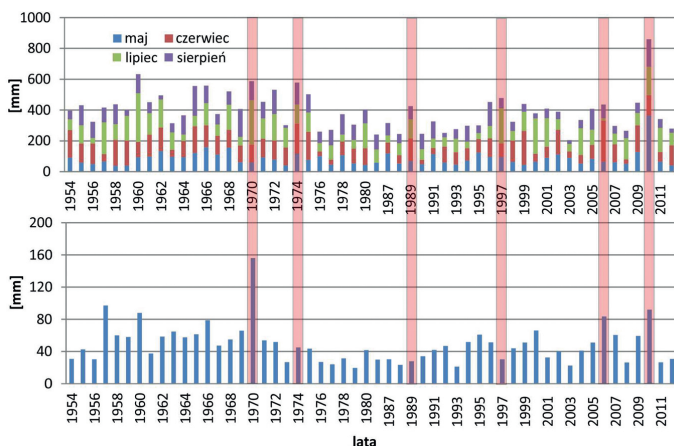
Próby mikroskopowe poddano dalszej analizie. Przy pomocy mikroskopu polaryzacyjnego (Nikon 50iPOL) dla całych przekrojów poprzecznych wykonano zdjęcia. Powstałe obrazy wykorzystano do analizy zmian struktury komórek drewna w programie WinCELL Pro 2010 (Regent). Do analiz wybrane zostały używane powszechnie w analizach dendrogeomorfologicznych

wskaźniki anatomiczne. Zmierzono średnią wielkość powierzchni komórek w drewnie wczesnym, szerokość przyrostów rocznych, udział drewna późnego i wczesnego. W celu uzyskania istotnych statystycznie średnich wartości reprezentujących dany przyrost roczny każda cecha drewna została zmierzona na minimum 30 komórkach. Pomiary przeprowadzono dla każdej próby w dwóch różnych promieniach, sprawdzając w ten sposób różnice w ilości przyrostów rocznych oraz zmiany poszczególnych cech w różnych częściach przekroju poprzecznego przez korzeń. Ponadto dla fragmentów korzeni pochodzących z tego samego drzewa wykonano datowanie pomostowe. Obliczono procentową zawartość drewna późnego w przyrostach rocznych (funkcja path analysis; Denne 1988):

$$2 * (a+c) \geq b,$$

gdzie a i c to grubość ścian, b – długość światła komórki.

W celu sprawdzenia zależności aktywności osuwiska od warunków meteorologicznych do analiz wykorzystano dane opadowe z okresu 1987–2012, które pochodziły ze stacji meteorologicznej Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Łazach (stacja położona w odległości ok. 2 km, na wysokości 246 m n.p.m.). Dla okresu 1954–1981 wykorzystano dane zebrane dla stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Bochni (230 m n.p.m.). Opady w 2010 roku na tle średnich wartości z wielolecia cechują się znacznie wyższymi wartościami zarówno dla całego roku, miesięcy letnich, jak i maksymalnych wartości opadów dobowych (ryc. 2). W 2010 roku w związku z wysokimi wartościami opadów doszło do przekroczenia opadowych wartości progowych uaktywniających procesy osuwiskowe (Starkel 1996, 2012). Wysokie wartości opadów dobowych wystąpiły również w latach 1960, 1970, 1995 i 2006. W pracy zwrócono uwagę na opady mające miejsce w okresie wegetacyjnym, gdyż mogą one wpływać na uaktywnianie osuwisk, a tym samym decydować o zmianach anatomicznych drewna korzeni.



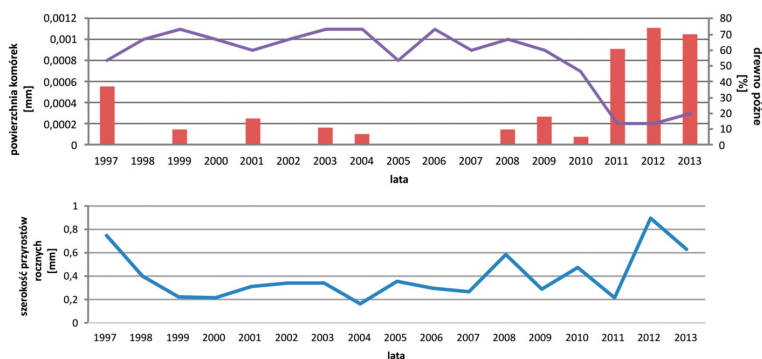
Ryc. 2. Sumy miesięcznych (A) i dobowych (B) opadów okresu wegetacyjnego odnotowane dla stacji Bochnia (1954–1981) i Łazy (1987–2012); pionowy pasek oznacza lata, w których odnotowano zmiany anatomiczne w korzeniach

Fig. 2. Total monthly (A) and daily (B) precipitation during the vegetation season recorded for Bochnia (1954–1981) and Łazy (1987–2012 stations); vertical bar indicates the years of roots' anatomy changes

Wyniki i dyskusja

Analizowane korzenie różnią się wiekiem. Większość z nich jest kilkunastoletnia i krzywa ich wzrostu sięga do 2002 roku. Jedynie korzeń opróbowany w centralnej części skarpy osuwiskowej jest starszy i wydatowany na rok 1956 (ryc. 1, korzeń 001). W analizowanych korzeniach zmiany anatomiczne, potencjalnie związane z osuwaniem, zostały zidentyfikowane w różnych okresach. Pierwsze zmiany widoczne są w starszych korzeniach już dla lat 1968–1971 oraz 1975–1976. Kolejne sygnały pochodzą z lat 1978–1979 i 1981 oraz 1990–1991 i 1997–1998. Odnaczają się one nagłym spadkiem wielkości komórek drewna wczesnego i wzrostem procentowej zawartości drewna późnego.

Wartości wskaźników anatomicznych w młodszych korzeniach podlegają modyfikacji w okresie 2010–2012. Zmiany nie są jednoczesne na całym profilu poprzecznym przez korzeń. Zaobserwowano przesunięcie poszczególnych modyfikacji w różnych częściach korzenia o ok. 1–2 lat. W większości analizowanych korzeni (70%) w ostatnich przyrostach rocznych (2010–2013) znacznie większy jest procentowy udział drewna późnego oraz zauważalna jest obecność drewna kompresyjnego. W 2011 roku zawartość drewna późnego wraz z drewnem kompresyjnym wzrasta w różnych korzeniach o 26–48%. W kolejnych latach odnotowany jest dalszy wzrost procentowej zawartości drewna późnego (ryc. 3). W roku, w którym obserwowana jest największa zawartość drewna późnego, jednocześnie obserwowana jest największa długość komórek drewna późnego.

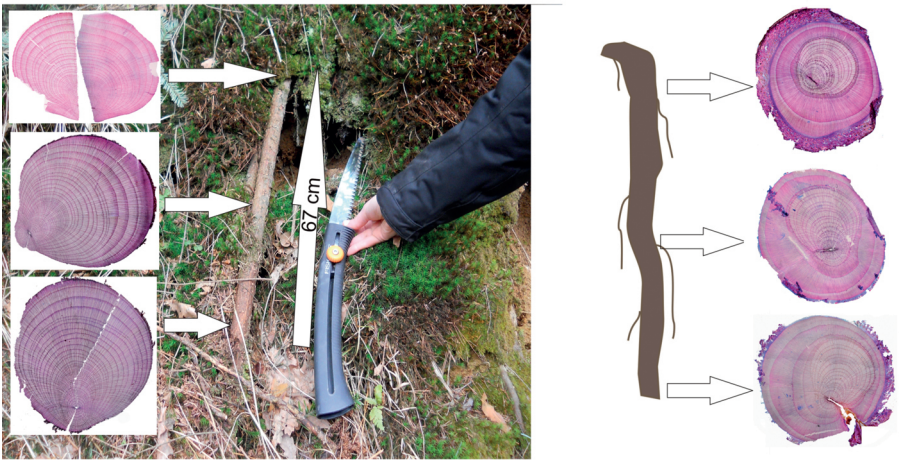


Ryc. 3. Wskaźniki anatomiczne korzenia jodły (002 – patrz ryc. 1)

Fig. 3. Anatomical indicators of silver fir root (002 – see Fig. 1)

W dwóch korzeniach w 2010 roku widoczny jest nagły wzrost dekoncentryczności przyrostów rocznych, któremu towarzyszy nierównomierny rozkład procentowej zawartości drewna późnego wraz z kompresyjnym (ryc. 4a). W zewnętrznej (odstokowej) części korzenia w 2010 roku znacznie wzrasta szerokość przyrostu rocznego, w tym samym czasie w wewnętrznej części korzenia, ułożonej najbliżej ściany skarpy osuwiskowej, notowany jest spadek jego szerokości aż do całkowitej redukcji. W jednym z korzeni obserwowana jest odwrotna tendencja, czyli po odsłonięciu wzrasta koncentryczność przyrostów rocznych (ryc. 4b). Spadek powierzchni komórek drewna wczesnego zachodzi z rocznym opóźnieniem w stosunku do uaktywnienia procesu osuwania (ryc. 4). Taka sytuacja została zaobserwowana w przyrostach rocznych z 2010,

jak również w przypadku starszych korzeni dla przyrostów rocznych z lat 1970, 1974, 1989, 1997 i 2006, co sugeruje występowanie osuwania także w tych latach. Dodatkowo dla wymienionych lat stwierdzono, że zmiany zawartości drewna późnego i szerokości przyrostów rocznych, jak i pojawienie się drewna kompresyjnego następują w tym samym roku co ekstremalne zdarzenie opadowe lub z rocznym opóźnieniem. Wyraźny jest brak istotnej statystycznie korelacji ($r = 0,15$) pomiędzy powierzchniami komórek drewna wczesnego a szerokościami przyrostów rocznych. Datowanie pomostowe wykazało, że w latach kiedy odnotowane zostały zmiany wskaźników anatomicznych, wzrasta niekompletność korzenia wzdłuż profilu podłużnego. Zaobserwowane nieregularności są związane z typowym dla korzeni wyklinowywaniem się przyrostów rocznych w profilu podłużnym i poprzecznym (Fayle 1968, 1975; Krause i Morin 1995, 1999). Redukcje szerokości przyrostów rocznych są szczególnie zauważalne rok po odsłonięciu w przekrojach poprzecznych korzeni w ich odsłoniętych fragmentach.



Ryc. 4. Zmiany koncentryczności przyrostów rocznych w korzeniach (A – 004, B – 006)
Fig. 4. Changes of root's tree ring eccentricity (A – 004, B – 006)

Analizy zmian anatomicznych w odsłanianych korzeniach mogą pomóc w rozpoznaniu dynamiki osuwisk. W roku 1971 w badanych korzeniach następuje po raz pierwszy spadek powierzchni komórek drewna wczesnego o ok. 50–60% w porównaniu z latami poprzednimi. Taka zmiana ewidentnie związana jest z odsłonięciem korzenia (Gärtner i in. 2001; Gärtner 2003). Sygnały pochodzące z najstarszego korzenia w postaci zmian anatomicznych drewna wczesnego i późnego wskazują na rozwój centralnej części osuwiska już w latach 70. XX wieku. Pozostałe młodsze korzenie znajdujące się w bocznej części skarpy osuwiskowej zostały odsłonięte w 2010 roku. Na tej podstawie można wnioskować, iż w 2010 roku doszło do poszerzenia formy osuwiskowej.

Kilkukrotne zmiany powierzchni komórek drewna wczesnego mogą być powiązane z etapowym rozwojem skarpy osuwiska. W najstarszym korzeniu na całym profilu poprzecznym rozpoznany został duży udział drewna późnego i kompresyjnego. Bodoque i in. (2005) i Rubiales i in. (2008) wskazywali na nagły wzrost zawartości drewna późnego w korzeniach poddanych

stopniowym procesom erozyjnym. Zmiany w drewnie późnym i pojawienie się drewna kompresyjnego poprzedzają zmiany w drewnie wczesnym i następują na kilka lat przed odsłonięciem korzenia. Takie przesunięcie w czasie, reakcji korzenia na różne bodźce środowiskowe zostało również zaobserwowane przez Wrońską-Walach (2014). Wiązane jest z powolnymi zmianami warunków środowiskowych otoczenia korzenia, co w przypadku osuwisk może wskazywać na stopniowy rozwój szczelin nad skarpią osuwiskową.

Lata, w których występują zmiany anatomiczne w korzeniach, w większości nawiązują do warunków opadowych. Pierwszy rok, kiedy występują wysokie sumy opadów miesięcy letnich to 1960. Wówczas nie stwierdzono zmian anatomicznych ze względu na młody wiek korzeni. W 1970 roku zmiany zostały odnotowane w najstarszym korzeniu i wystąpiły wówczas intensywne opady w lipcu dodatkowo z wysokimi wartościami maksymalnych opadów dobowych, które mogły uaktywnić procesy osuwiskowe (ryc. 2). W latach 1974–1975, 1989 i 2006 miały miejsce wysokie opady w czerwcu, co najprawdopodobniej odzwierciedla się w reakcji w korzeniach. W roku wystąpienia intensywnych opadów następuje wzrost procentowej zawartości drewna późnego, natomiast zmiany drewna wczesnego odnotowane są z rocznym opóźnieniem. Bardzo wyraźne zmiany anatomiczne wystąpiły również w 1998 roku, co związane jest z ekstremalnymi wartościami opadów dla lipca w 1997 roku. Wysokie wartości opadów miesięcy letnich miały również miejsce w okresie 2000–2002.

W przypadku analizowanych korzeni zaobserwowano zależność pomiędzy zmianami anatomicznymi w drewnie a porą wystąpienia opadów. Reakcja korzeni na presję środowiskową jest związana z naturalnym cyklem aktywności komórek kambium i etapem rozwoju przyrostu radialnego w czasie okresu wegetacyjnego (Schweingruber 1996, 2007, Zielski i Krąpiec 2004; Thibeault-Martel i in. 2008). W przypadku wystąpienia intensywnych opadów na początku okresu wegetacyjnego zmiany drewna późnego zachodzą w tym samym roku. Podobną prawidłowość zauważyli już Malik (2006) i Bodoque i in. (2011), wykorzystując anatomię korzeni do analizy procesów erozyjnych. Stwierdzili przesunięcie zmian anatomicznych w drewnie wczesnym o jeden rok w stosunku do zmian zachodzących w drewnie późnym. Na podstawie analizowanych korzeni zauważono, że jeżeli opady wystąpią w drugiej połowie okresu wegetacyjnego wówczas całość zmian anatomicznych przesunięta jest o jeden rok.

Wnioski

- Zmiany wskaźników anatomicznych w korzeniach odsłoniętych w wyniku działania procesów osuwiskowych nie zachodzą jednocześnie na całym przekroju poprzecznym przez korzeń. Przesunięcie reakcji w korzeniu może wynieść od 1 do 2 lat.
- Odsłonięte pionowe korzenie jodły wykształcają szerokie przyrosty roczne z dużą zawartością drewna kompresyjnego i tym samym dążą do wykształcenia układu przyrostów rocznych, który jest w największym stopniu odporny na stropy mechaniczne.
- Pomimo niewielkiej liczby korzeni wziętych do analizy z przeprowadzonych badań wynika, że reakcje korzeni na bodźce środowiskowe mogą być potencjalnie wykorzystywane do rekonstrukcji czasowego i przestrzennego rozwoju osuwisk.

Literatura

- Alestalo J. 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105: 1–140.
- Ballesteros-Cánovas J.A., Bodoque J.M., Lucía A., Martín-Duque J.F., Díez-Herrero A., Ruiz-Villanueva V., Rubiales J.M., Genova M. 2013. Dendrogeomorphology in badlands: Methods, case studies and prospects. *Catena*, 106: 113–122.
- Bodoque J.M., Díez-Herrero A., Martín-Duque J.F., Rubiales J.M., Godfrey A., Pedraza J., Carrasco R. M., Sanz M. A. 2005. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: two examples from Central Spain. *Catena*, 64: 81–102.
- Bodoque J.M., Lucía A., Ballesteros J.A., Martín-Duque J.F., Rubiales J.M., Genova M. 2011. Measuring medium-term sheet erosion in gullies from trees: A case study using dendrogeomorphological analysis of exposed pine roots in central Iberia. *Geomorphology*, 134: (3–4) 417–25.
- Buchwał A. 2008. Dendrogeomorphological records of trail erosion. *TRACE – Tree Ring in Archaeology, Climatology and Ecology*, 7: 166–170.
- Buchwał A., Winowski M. 2009. Determination of rotational landslides on the moraine cliff coast: dendrogeomorphological approach (Southern Baltic, Poland). Conference papers. 7th International Conference on Geomorphology, Melbourne.
- Corona C., Lopez J., Rovéra G., Stoffel M., Astrade L., Berger F. 2011. High resolution, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots (Draix, Alpes de Haute-Provence) – critical review of existing approaches and independent quality control of results. *Geomorphology*, 125: 433–44.
- Denne M. P. 1988. Definition of Latewood according to Mork (1928). *IAWA Bulletin*, 10 (1): 59–62.
- Fayle D.F.C. 1968. Radial Growth in Tree Roots – Distribution, Timing, Anatomy, Faculty of Forestry, University of Toronto, Technical Report Nr. 9, Toronto.
- Fayle D.F.C. 1975. Distribution of Radial Growth During the Development of Red Pine Root System. *Can. J. For. Res.* 5: 608–625.
- Gärtner H., Schweingruber F.H., Dikau R. 2001. Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19 (1): 81–91.
- Gärtner H. 2003. Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse. *Dissertationes Botanicae*, 378: 1–118.
- Gärtner H. 2007. Tree roots—Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*, 86 (3–4): 243–251.
- Hupp C.R. 1986. The headward extend of fluvial landforms and associated vegetation on Massanutten Mountain, Virginia. *Earth Surf. Proc. Landf.* 11: 545–555.
- Kojs P., Malik I., Wistuba M., Stopka R., Trąbka K. 2012. Mechanizmy wzrostu ekscentrycznego i formowania się drewna reakcyjnego w kontekście badań dendrogeomorfologicznych – wprowadzenie do nowej hipotezy. *Studia i Materiały CEPL, Rogów*, 30 (1): 147–156.
- Koprowski M., Winchester V., Zielski A. 2010. Tree reactions and dune movements: Słowiński National Park, Poland. *Catena*, 81: 55–65.

- Krause C., Morin H. 1995. Impact of spruce budworm defoliation on the number of latewood tracheids within balsam fir and black spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 25: 2029–2034.
- Krause C., Morin H. 1999. Tree-ring patterns in stems and root systems of black spruce and balsam fir after spruce budworm outbreaks. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 1583–1591.
- Krąpiec M., Margielewski W. 2000. Analiza dendrogeomorfologiczna ruchów masowych na obszarze polskich Karpat fliszowych. *Kwartalnik AGH Geologia*, 26 (2): 141–171.
- LaMarche V.C. 1968. Rates of slope degradation as determined from Botanical Evidence. White Mountains California. U.S. Geological Survey Professional Paper: 341–377.
- Malik I. 2006. Contribution to understanding the historical evolution of meandering rivers using dendrochronological methods: example of the Mała Panew River in southern Poland. *Earth Surf. Process and Landforms*, 31: 1227–1245.
- Malik I. 2008. Dating of small gully formation and establishing erosion rates in old gullies under forest by means of anatomical changes in exposed tree roots (Southern Poland). *Geomorphology*, 93 (3–4): 421–436.
- Malik I., Ciszewski D. 2008. Meandering river bank erosion and channel lateral migration recorded in black alder (*Alnus glutinosa*) tree rings. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 7: 133–139.
- Mattheck C. 1991. *Trees — the mechanical design*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Pelfini M., Santilli M. 2006. Dendrogeomorphological analyses on exposed roots along two mountain hiking trails in the central Italian Alps. *Geogr. Ann.* 88 A (3): 223–236.
- Pérez-Rodríguez R., Marques M.J., Bienes R. 2007. Use of dendrochronological method in *Pinus halepensis* to estimate the soil erosion in the South East of Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 378: 156–160.
- Rubiales J.M., Bodoque J.M., Ballesteros J.A., Díez-Herrero A. 2008. Response of *Pinus sylvestris* roots to sheet-erosion exposure: an anatomical approach. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8: 223–231.
- Ruiz-Villanueva V., Díez-Herrero A., Stoffel M., Bollschweiler M., Bodoque J.M., Ballesteros J.A. 2010. Dendrogeomorphic analysis of Flash floods in a small ungauged mountains catchment (Central Spain). *Geomorphology*, 118: 383–392.
- Saez J.S., Corona C., Stoffel M., Rovéra G., Astrade L., Bérger F. 2011. Mapping of erosion rates in marly badlands based on coupling of anatomical changes in exposed roots with slope maps derived from LIDAR data. *Earth Surf. Process. Landf.* 36 (9): 1162–1171.
- Shroder J.F. 1980. Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating. *Prog. Phys. Geog.* 4: 161–188.
- Schweingruber F.H. 1990. *Microscopische Holzanatomie. Anatomie microscopique du bois. Microscopic Wood Anatomy*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Schweingruber F.H. 1996. *Tree Ring and environment. Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP, Haupt, Birmensdorf.
- Schweingruber F.H. 2007. *Wood Structure and Environment*. Springer Series in Wood Science. Springer, Heidelberg.
- Stachurska A. 1995. Szata roślinna progó Pogórza Karpackiego między Rabą i Uszwią. W: Kaszowski L. (red.). *Dynamika i antropogeniczne przeobrażenia środowiska przyrodniczego progó Karpat pomiędzy Rabą a Uszwią*. Instytut Geografii UJ, Kraków: 111–113.

- Starkel L. 1996. Geomorphic role of extreme rainfalls in the Polish Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balc.* 30: 21–38.
- Starkel L. 2012. Searching for regularities of slope modelling by extreme events (diversity of rainfall intensity-duration and physical properties of the substrate). *Landform Anal.* 21: 27–34.
- Świąchłowicz J. 1991. Budowa geologiczna i rzeźba zlewni Starej Rzeki. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 83: 165–184.
- Thibeault-Martel M., Krause C., Morin H., Rossi S. 2008. Cambial Activity and Intra-annual Xylem Formation in Roots and Stems of *Abies balsamea* and *Picea mariana*. *Annals of Botany*, 102: 667–674.
- Vanderkerckhove L., Muys B., Poesen J., Weerd de B., Coppé N. 2001. A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates. *Catena*, 45: 123–161.
- Wistuba M., Malik I. 2011. Indeks dekoncentryczności przyrostów rocznych drzew – narzędzie do identyfikacji współczesnych ruchów osuwiskowych. *Czasopismo Geograficzne*, 82 (4): 401–421.
- Wrońska-Wałach D. 2009. Dendrogeomorphological analysis of a headwater area in the mountain area. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 43: 97–112.
- Wrońska-Wałach D. 2014. Differing response to extreme rainfall events in headwater areas recorded by wood anatomy in roots (Gorce Mountains, Poland). *Catena*, 118: 41–54.
- Zielski A., Krąpiec M. 2004. *Dendrochronologia*. PWN, Warszawa.

Anna Zielonka, Bartłomiej Oleszko, Ewa Juszcak, Dominika Wrońska-Wałach
Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ania.zielonka@uj.edu.pl
bartek.oleszko@gmail.com
ewa.juszcak@uj.edu.pl
dominika.wronska-walach@uj.edu.pl