

Ocena dokładności dendrochronologicznego datowania ekstremalnych zdarzeń geomorfologicznych

Ryszard J. Kaczka, Barbara Czajka, Karolina Janecka

Abstrakt. Na potrzeby datowania gwałtownych, wysokoenergetycznych procesów, powodujących uszkodzenia drzew najlepszym narzędziem jest analiza anomalii drewna wtórnego (uszkodzenia pnia i korzeni, występowanie traumatycznych kanałów żywicznych i drewna reakcyjnego). Celem badań była analiza dokładności datowań zdarzeń geomorfologicznych powodujących trwałe uszkodzenia pni drzew. Na podstawie analizy 120 prób, reprezentujących 40 zranień stwierdzono, że najdokładniejszą i najpewniejszą metodą datowania jest wykorzystanie zestawienia prób zawierających sekwencję przyrostów od rdzenia do uszkodzenia i traumatyczne kanały żywiczne. W obydwu przypadkach konieczne jest zachowanie procedury wstępnej polegającej na sprawdzeniu kompletności sekwencji przyrostów w obydwu próbach.

Słowa kluczowe: dendrogeomorfologia, ekstremalne procesy geomorfologiczne, świerk pospolity, blizny, kalus

Abstract. Accuracy of the dendrochronological dating of the extreme geomorphological events. Dating of fast, highly-energetic and often dangerous events is mostly related to employing of the wood anomalies such as scars, traumatic resin ducts and reaction wood. The aim of the study was to analyse the precision of dating the geomorphological processes damaging the trees. Based on 120 samples, representing 40 injuries we conclude that the use of sample with complete tree-ring sequences from pith to injury combined with traumatic resin ducts is the most accurate method. This procedure must be preceded by cross-dating of both cores.

Key words: dendrogeomorphology, high-magnitude processes, Norway spruce, injures,

Wstęp

Dendrogeomorfologia jest jedną z najdynamiczniej rozwijających się w skali świata gałęzi dendrochronologii (Stoffel 2006; Stoffel i Corona 2014). Wytworzyła ona specyficzne narzędzia badawcze wykorzystywane w badaniach stabilności stoków, akumulacji osadów, występowania trzęsień ziemi itp. (Scott i in. 1996; Jacobey i in. 1997; McAuliffe i in. 2006). Przyrosty roczne drzew zapisują zarówno procesy geomorfologiczne o krótkotrwałym, gwałtownym przebiegu, jak i te zachodzące powoli. Techniki badania przyrostów rocznych drzew wykorzystywane są do datowania, oceny intensywności oraz przestrzennego zróżnicowania procesów kształtujących powierzchnię Ziemi. Metoda opiera się na dwóch źródłach informacji: a) badaniu sekwencji przyrostów rocznych (Carrara 1979; Malik i Wistuba 2012) i b) analizie występowania anomalii

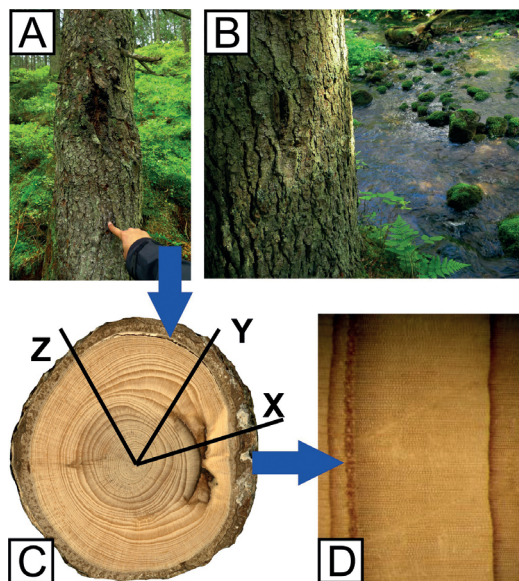
anatomicznych w drewnie wtórnym (Cherubini i in. 1997; Stoffel i in. 2005; Díez-Herrero 2013). Spelżywanie gruntu czy przemieszczanie się pokrywy śnieżnej powoduje formowanie się drewna reakcyjnego (Alestalo 1971; Lundstrom i in. 2007). Procesy erozyjne gleb mogą zapisywać się w anatomii drewna korzeni (Bodoque i in. 2006; McAuliffe i in. 2006). Wysokoenergetyczne procesy geomorfologiczne takie jak: lawiny, obrywy, spływy gruzowe czy wezbrania powodują powstawanie zranień mechanicznych, a następnie wykształcanie w drzewach iglastych traumatycznych kanałów żywicznych (Lundstrom i in. 2008). Datowanie oraz określanie dynamiki tych gwałtownych zdarzeń wiąże się z badaniem blizn, dekapitacji czy odkształceń pni drzew (Stoffel 2006; Bollschweiler i in. 2008).

Celem badań było a) porównanie datowania zranień przy użyciu 3 nośników informacji: sekwencji przyrostów powstałych przed uszkodzeniem pnia, drewna zarastającego zranienie oraz traumatycznych kanałów żywicznych, b) ocena niezgodności datowania wynikająca z zastosowania różnych nośników informacji i c) określenie zależności między zaobserwowanymi błędami a rozmiarami uszkodzenia, wielkością i wiekiem drzewa. Otrzymane wyniki należy traktować jako *case study* i przyczynek do dyskusji o metodach stosowanych w dendrogeomorfologii.

Materiały oraz metody

W pracy wykorzystano wywierty dordzeniowe pochodzące z 40 świerków pospolitych (*Picea abies* L. Karst) rosnących wzdłuż koryt potoków górskich w Tatrach (Chochołowski, Roztoka oraz Rybi Potok), gdzie odnotowuje się liczne wezbrania (Kundzewicz i in. 2014). Badane drzewa nosiły ślady uszkodzeń pnia powstałych w wyniku uderzeń fragmentami skał (transport saltacyjny lub wleczenie), bądź też rumoszem drzewnym (flotacja) w czasie wezbrań. Stano-wiska badawcze zlokalizowane są w piętrze regla górnego, na wysokości od 1000 do 1300 m n.p.m. Z drzew rosnących w najbliższym sąsiedztwie koryta oraz posiadających widoczne blizny, pobrano świdrem przyrostowym Presslera 3 odwierty: bezpośrednio z blizny (X), tuż nad blizną (Y) – próba przeznaczona do analizy traumatycznych kanałów żywicznych oraz próbę z nieuszkodzonej części pnia jako próbę referencyjną (Z) (ryc. 1). W przyrostach zarastających uszkodzenia oraz w ich bezpośrednim sąsiedztwie traumatyczne kanały żywiczne występują w kilku bądź kilkunastu kolejnych słojach (Gaertner i Heinrich 2009; Stoffel i Corona 2014). Jedynie pierwszy przyrost z występującymi TKZ może być wiązany ze zdarzeniem geomorfologicznym, pozostałe to wtórna reakcja drzewa na uszkodzenie. Wszystkie badane blizny mają charakter w pełni zamkniętych zranień. W okresie kilkunastu, kilkudziesięciu lat od zdarzenia drzewa te wykształciły na tyle dużo drewna wtórnego, aby w powolnym procesie zabliznić – zamknąć zranione miejsce. Procedura poboru prób była obarczona sporymi trudnościami. Główne utrudnienia polegały na braku możliwości dokładnego określenia granic zranienia – ukrytego pod korą i nieokreśloną porcją drewna. Każdy uzyskany z blizny odwiert został podzielony na dwie następujące po sobie części: część zawierającą sekwencję przyrostów powstałych przed zranieniem (PPZ) oraz sekwencję przyrostów zarastających zranienie (PZZ). Do testów wyselekcjonowano 120 odwiertów (X, Y i Z) reprezentujących 40 blizn.

Odwierty spreparowano według standardowych technik dendrochronologicznych, tak aby otrzymać powierzchnie drewna z dobrze widocznymi zarówno sekwencjami słoików, jak i cechami anatomicznymi ksylemu. Następnie próby zarchiwizowano poprzez skanowanie w rozdzielczości od 1200 do 4800 DPI. Przy użyciu programu Coorecorder firmy Cybis Elektronik & Data AB zmierzono szerokości przyrostów rocznych. Wszelkie wątpliwości dotyczące przebiegu

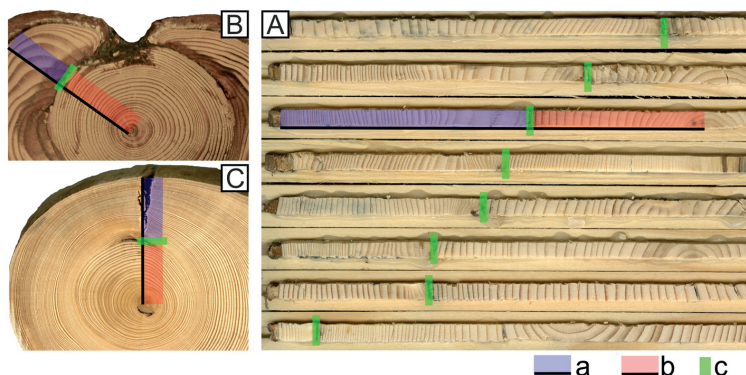


Ryc. 1. Przykład uszkodzeń powstałych w wyniku wysokoenergetycznego procesu geomorfologicznego – wody wezbraniowe transportują materiał, który rani drzewa rosnące blisko koryta (A, B). Blizny pozostające po zranieniach badano, pobierając trzy próby (C): z uszkodzonej części pnia – X, z części gdzie sekwencja przyrostów nie została naruszona – Z, obok blizny – Y, w celu uchwycenia przyrostów z traumatycznymi kanałami żywicznymi (D)

Fig. 1. Riparian forest as the example of the location where high-energetic geomorphological processes cause trees damages – debris transported during flood hit the trunk and injure the tree (A, B). The scars were sampled by taking tree cores (C): from injured part of the trunk – X, from undamaged part of the trunk – Z and near the scar – Y, to obtain the rings with traumatic resin ducts (D)

granic przyrostów sprawdzano, używając mikroskopu stereoskopowego. W ten sposób określano również wystąpienie i intensywność traumatycznych kanałów żywicznych. Datowanie pomostowe zostało wykonane w dwóch etapach. Posługując się programem CDendro, zweryfikowano sekwencję próby pochodzącej z nieuszkodzonej części drzewa (próba Z) z lokalną chronologią zbudowaną z ok. 60 świerków rosnących na podobnej wysokości n.p.m. oraz w podobnym środowisku, co analizowane drzewa. Weryfikacja próby Z pod względem kompletności przyrostów stanowiła istotny element analiz, bowiem na dalszym etapie prowadzonych testów stanowiła ona podstawę do budowy krzywej referencyjnej, służącej do datowania pomostowego prób X oraz Y. W badaniach przyjęto jako wartość krytyczną $T_{test} > 3$. W przypadku gdy dendrogram próby Z nie spełniał przyjętych kryteriów, do datowania służyła chronologia lokalna.

Scharakteryzowano zależności między zaobserwowanymi różnicami w datowaniach a wybranymi parametrami drzewa (obwodem, wiekiem) oraz zranienia (przybliżona wielkość). Ze względu na stosunkowo małą wielkość próby statystycznej ($n = 40$) zdecydowano się zastosować bardziej konserwatywne podejście i dla testów istotności współczynników korelacji liniowej Pearsona przyjęto wartość progową $p = 0,01$. Wytyczono linię regresji oraz pas regresji na poziomie ufności 95%. Wykorzystano również elipsę normalną na poziomie 95% przy założeniu, że dwie zmienne podlegają dwuwymiarowemu rozkładowi normalnemu.



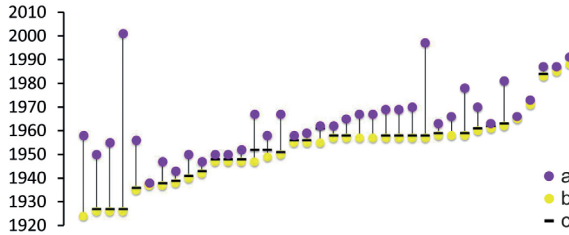
Ryc. 2. Próby w postaci rdzeni (A) oraz krążków z bliznami częściowo (B) i całkowicie zabliznionymi (C): a) przyrosty zarastające zranienie (PZZ), b) sekwencja przyrostów wykształconych przed zranieniem (PPZ), c) strefa zranienia

Fig. 2. Samples as cores (A) and discs collected from open (B) and closed (C) scars: a) the outer part consisted of rings overgrowing the injury, b) inner part of the tree, formed before the injury, c) the zone of injury

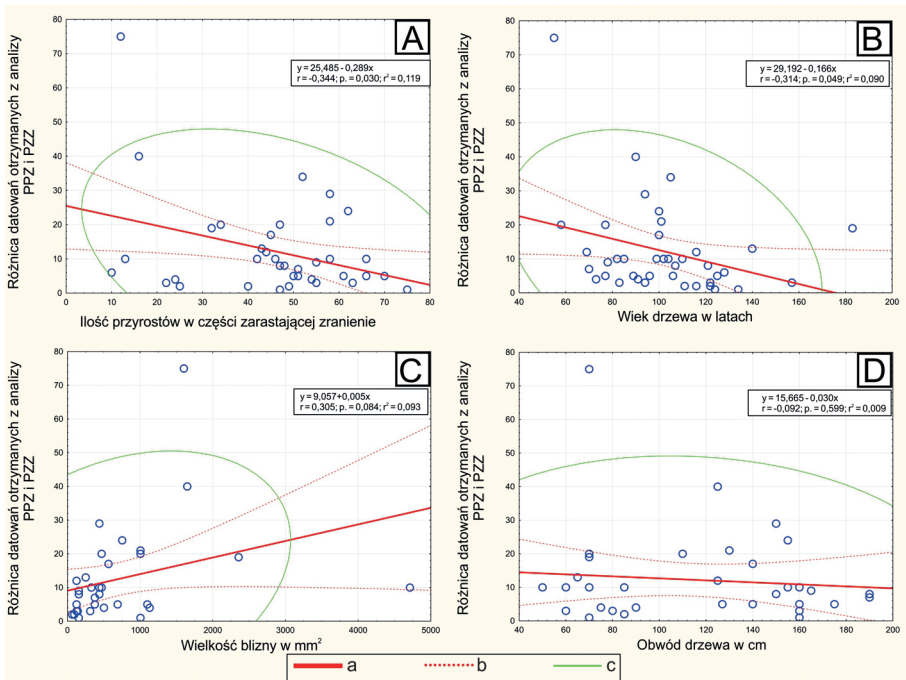
Wyniki

Przeprowadzona ocena dokładności określenia czasu powstania uszkodzeń opierała się na prostym teście porównawczym. Różnice wyników datowań z zastosowaniem traumatycznych kanałów żywicznych (TKZ), sekwencji przyrostów przed zranieniem (PPZ) oraz pierwszego przyrostu zarastającego zranienie (PZZ) przedstawia rycina 3. W 20% badanych rdzeni zauważono kilkudziesięcioletnie rozbieżności (20–75 lat) w datowaniu zdarzenia przy użyciu sekwencji PZZ i PPZ z prób X. Największa niezgodność wynosi 75 lat, natomiast najmniejsza 1 rok i występuje w 5% analizowanych prób. Najczęściej (30%) występuje rozbieżność kilkunastu lat (od 10 do 19). Datowanie zranień przy użyciu TKZ w 70% wykazuje roczne przesunięcie w stosunku do datowania przy użyciu PPZ, podczas gdy zaledwie w 12,5% prób przesunięcie to wynosi od 2 do 6 lat. Te różnice mogą być tłumaczone przez opóźnianie reakcji drzewa (powstanie TKZ) na uszkodzenie pnia. W pozostałych przypadkach (17,5%) porównanie nie było możliwe – w próbach nie stwierdzono występowania traumatycznych kanałów żywicznych. Porównanie synchroniczności datowań przy użyciu TKZ oraz pierwszego PZZ wykazały, że w 5% prób synchroniczność ta jest całkowita, w 32,5% drzew występuje rozbieżność daty wahająca się od 1 roku do 5 lat, 15% wykazuje różnicę od 5 do 10 lat, 17,5% to kilkunastoletnie rozbieżności, natomiast 12,5% wydatowanych zranień obarczonych jest kilkudziesięcioletnim błędem (20–74 lat).

Datowanie uszkodzeń, które zostały w pełni zabliznione, stanowi wyzwanie metodyczne. Niemożliwe jest precyzyjne określenie wielkości uszkodzenia, a co za tym idzie wskazanie jednoznacznego miejsca poboru prób. W tym przypadku różnice (1–74 lat) między datami otrzymanymi z części wewnętrznej (PPZ) i zewnętrznej, zarastającej uszkodzenie (PZZ) blizny wydają się czymś naturalnym. Różnica ta nie jest zależna od wielkości tkanki, która zarasta uszkodzenie (ryc. 4A), o czym świadczy niski współczynnik korelacji (-0,34). Różnica datowań otrzymanych z analizy PPZ i PZZ nie jest także zależna od wieku drzewa, które zostało zranione (ryc. 4B).



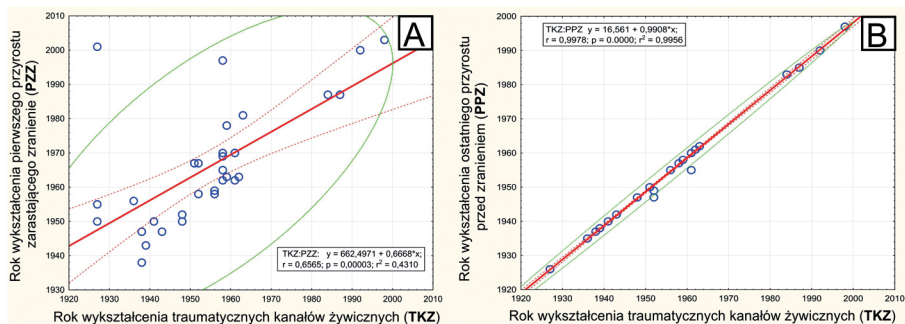
Ryc. 3. Wyniki datowania 40 zranień, otrzymane z zastosowaniem różnych nośników informacji: a) próba PZZ (rok powstania pierwszego przyrostu zarastającego zranienie), b) próba PPZ (rok ostatniego przyrostu wykształconego przed zdarzeniem), c) rok wystąpienia traumatycznych kanałów żywicznych
Fig. 3. Results of dating of 40 injuries obtained from three different proxies: a) from the outer part consisted of rings overgrowing the injury, b) from inner part of the tree, formed before the injury; c) year when the traumatic resin ducts were produced



Ryc. 4. Wykresy zależności różnic w datowaniach z zastosowaniem PPZ, PZZ z testowanymi parametrami: ilości przyrostów zarastających zranienie (A), wiekiem pierścieniowym drzewa (B), wielkością zranienia (C) oraz obwodem drzewa (D). Objasnienia: a) linia regresji; b) pas regresji na poziomie ufności 95%; c) elipsa normalna na poziomie 95%
Fig. 4. Scatter plots of relationship between PPZ/PZZ dating differences and: TRD (A and B) and relation between dating differences and number of tree-ring overgrowing the wound (A), tree age (B), wound size (C) and tree perimeter (D). Legend: a) simple regression; b) regression belt with confidence interval 95%; c) normal ellipse on level 95%

Wartość współczynnika korelacji jest nieistotna statystycznie i wynosi -0,31. Różnica datowań nie wynika także z wielkości samej blizny (ryc. 4C). Współczynnik korelacji wynosi 0,3. Nie stwierdzono także związku różnicy datowań otrzymanych z analizy PPZ i PZZ z wielkością samego pnia, wyrażoną obwodem drzewa ($r = -0,09$; ryc. 4D).

Zestawienie dat z 40 zranionych drzew wskazuje, że lepszym nośnikiem informacji o przeszłych zdarzeniach powodziowych są odwierty zawierające sekwencje przyrostów od rdzenia do momentu uszkodzenia tkanki pnia (PPZ) oraz obecność traumatycznych kanałów żywicznych (TKZ). Zgodność datowania zranień przy użyciu tych dwóch nośników informacji (ryc. 5A) jest stosunkowo wysoka, co potwierdza wartość współczynnika korelacji (0,65). Uwzględniając jednak potencjał technik dendrochronologicznych, wartość ta nie jest w pełni satysfakcjonująca, ponieważ jako rezultat zastosowania tej metody oczekiwana jest 100% synchroniczność dla dat uzyskanych przy pomocy dwóch różnych nośników informacji. Kilkuletnie, kilkunastoletnie, a tym bardziej kilkudziesięcioletnie rozbieżności są niepożądane, gdyż całkowicie zacierają obraz rekonstruowanego zdarzenia. Istnieje bardzo silna zbieżność między wynikami otrzymanymi z PPZ i TKZ (ryc. 5B), którą potwierdza istotny statystycznie współczynnik korelacji, wynoszący 0,99. W większości analizowanych odwiertów TKZ występują w przyroście powstałym rok po ostatnim słoju z części PPZ próby X. Jest to efekt naturalnego następstwa wydarzeń – traumatyczne kanały żywiczne powstają po zdarzeniu odpowiedzialnym za uszkodzenie drzewa. Jeśli zdarzenie miało miejsce odpowiednio późno w czasie trwania sezonu wegetacyjnego, TKZ powstają dopiero w przyroście powstającym w następnym roku.



Ryc. 5. Zbieżność dat zdarzeń otrzymanych z analiz traumatycznych kanałów żywicznych (TKZ) oraz: (A) przyrostów zarastających uszkodzenie (PZZ) i (B) sekwencji przyrostów wykształconych przed zranieniem. Parametry statystyczne: a) linia regresji; b) pas regresji na poziomie ufności 95%; c) elipsa normalna na poziomie 95%

Fig. 5. The comparison between dates obtained from traumatic resin ducts and: (A) outer and (B) inner parts of X sample. Statistics: a) simple regression; b) regression belt with confidence interval 95%; c) normal ellipse on level 95%

Wszystkie testowane parametry drzew, takie jak ilość przyrostów w części zarastającej zranienia, wiek drzewa, wielkość blizny oraz obwód drzewa nie mają wpływu na datowania zranień z wykorzystaniem PZZ. Wielkość różnic obydwu części zmienia się od roku do 74 lat i nie jest zależna od żadnego z wyżej wymienionych czynników. Ze względu na losowość występowania błędu i wielkość różnicy zastosowanie zewnętrznej części próby X jest niewskazane

nawet do szacunkowej oceny możliwego wieku zranienia. Daty z części wewnętrznej najczęściej są zsynchronizowane (uwzględniając możliwe roczne przesunięcie) z momentem pojawiania się pierwszych TKZ. Fizyczny i fizjologiczny mechanizm powstawania tych dwóch *proxy* jest całkowicie różny i niepowiązany ze sobą. Uprawnia to do wykorzystania ich do wzajemnej weryfikacji wyników datowań.

Wnioski

- Metoda prostego określenia ilości przyrostów powstałych po stronie zewnętrznej uszkodzenia daje wyniki bardzo odbiegające od rzeczywistej daty zdarzenia. Pojawiający się błąd jest przypadkowy i nie zależy od wieku blizny, obwodu pnia czy wielkości uszkodzenia.
- Najdokładniejszą metodą jest wykorzystanie sekwencji przyrostów wykształconych od rdzenia do momentu uszkodzenia, wydatowanej na podstawie dendrogramów z nieuszkodzonej części pnia oraz dodatkowo potwierdzonej występowaniem traumatycznych kanałów żywicznych.

Podziękowania

Badania sfinansowano z Polsko-Szwajcarskiego Programu Badawczego FLORIST „Zagrożenie powodziowe na przedpolu Tatr” (Flood risk on the northern foothills of the Tatra Mountain) – NR PSPB – 153/2010. Przeprowadzenie badań terenowych było możliwe dzięki pomocy i życzliwości pracowników Tatrzańskiego Parku Narodowego.

Literatura

- Alestalo J. 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*, 105: 1–139.
- Bodoque J.M., Diez-Herrero A., Martín-Duquea J.F., Rubiales J.M., Godfrey A., Pedraza J., Carrasco R.M., Sanz M.A. 2006. Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena*, 64: 81–102.
- Bollschweiler M., Stoffel M., Schneuwly D.M., Bourqui K. 2008. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiol.* 28: 255–263.
- Carrara P.E. 1979. The determination of snow avalanche frequency through tree-ring analysis and historical records at Ophir, Colorado, *Geological Society of America Bulletin*, 90 (8): 773–780.
- Cherubini P., Schweingruber F.H., Forster T. 1997. Morphology and ecological significance of intra-annual radial cracks in living conifers. *Trees structure and Function*, 11: 216–222.
- Diez-Herrero A., Ballesteros-Cánovas J.A., Bodoque J.M., Ruiz-Villanueva V. 2013. A new methodological protocol for the use of dendrogeomorphological data in flood risk analysis. *Hydrology Research*, 42 (2): 234–247.
- Gaertner H., Heinrich I. 2009. The formation of traumatic rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* (*Pinaceae*) as a result of wounding experiments in the dormant season. *IAWA Journal*, 30 (2): 199–215.

- Jacoby G.C., Bunker D.E., Benson B.E. 1997. Tree-ring evidence for an AD 1700 Cascadia earthquake in Washington and northern Oregon. *Geology*, 25 (11): 999–1002.
- Kundzewicz Z., Stoffel M., Kaczka R.J., Wyżga B., Niedźwiedz T., Pińskwar I., Ruiz-Villanueva V., Łupikasza E., Czajka B., Ballesteros-Canovas J.A., Małarzewski L., Choryński A., Janecka K., Mikuś P. 2014. Floods at the northern foothills of the Tatra Mountains – a Polish-Swiss research project. *Acta Geophysica*, 62 (3): 620–641.
- Lundstrom T., Heiz U., Stoffel M., Stockli V. 2007. Fresh-wood bending: linking the mechanic and growth properties of a Norway spruce stem. *Tree Physiol.* 27: 1229–1241.
- Lundstrom T., Stoffel M., Stockli V. 2008. Fresh-stem bending of fir and spruce. *Tree Physiol.* 28: 355–366.
- Malik I., Wistuba M. 2012. Dendrochronological methods for reconstructing mass movements — An example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity. *Geochronometria*, 39 (3): 180–196.
- McAuliffe J.R., Scuderi L.A., McFadden L.D. 2006. Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: Landscape responses to climate variation during the last 400yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Glob. Planet. Change*, 50: 184–201.
- Scott M.L., Friedman J.M., Auble G.T. 1996. Fluvial process and the establishment of bottomland trees. *Geomorphology*, 14: 327–339.
- Stoffel M., Schneuwly D., Bollschweiler M., Lievre I., Delaloye R., Myint M., Monbaron M. 2005. Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest—a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 68: 224–241.
- Stoffel M. 2006. A Review of Studies Dealing with Tree Rings and Rockfall Activity: The Role of Dendrogeomorphology in Natural Hazard Research. *Natural Hazard*, 39: 51–70.
- Stoffel M., Corona C. 2014. Dendroecological Dating of Geomorphic Disturbance in Trees. *Tree-Ring Research*, 70 (1): 3–20.

Ryszard J. Kaczka, Barbara Czajka, Karolina Janecka

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi

ryszard.kaczka@us.edu.pl

barczajka@wp.pl

karolinaejanecka@gmail.com