

Aktywność enzymatyczna gleb na obszarach sztucznej i naturalnej regeneracji lasu po klęsce huraganu w północno-wschodniej Polsce

Soil enzymatic activity in artificially and naturally regenerated forests after wind damage in north-eastern Poland

Grażyna Olszowska

Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ekologii Lasu, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

Tel. + 48 22 7150408, fax +48 22 7150507, e-mail: G.Olszowska@ibles.waw.pl

Abstract. The aim of the study was to describe biochemical reactions in the soil based on the activity of urease and dehydrogenases in Scots pine stands damaged during and differentially managed after hurricanes.

Soil enzymatic activity was investigated in 2005 and again in 2013 for selected stands in the Pisz Forest District where wind damage occurred in 2002. Most of the damaged stands were cut down and replanted, but 445 ha were left untouched for study purposes. The investigated areas differed with respect to stand damage and management. The enzymatic activity correlated well with the content of organic matter which was higher in organic than in mineral soils. In the area left to regenerate naturally, dehydrogenase and urease activity was higher in 2013 compared to 2005, which suggests the improvement of site conditions. The values of the examined biochemical parameters were correlated with the type of forest regeneration, with the forest soil regeneration being higher in artificially than in naturally regenerated stands. Changes of soil enzymatic activity were correlated with the level of stand damage and the type of management after wind damage.

Keywords: wind damage, urease, dehydrogenases, forest soils

1. Wstęp

Zaburzenia wielkoobszarowe, takie jak pożary i huragany, stanowią nieodłączny komponent ekosystemów leśnych i dają możliwość śledzenia naturalnych procesów regeneracyjnych na zniszczonym terenie (Dobrowolska 2006). W drzewostanie pohuraganowym wzrasta heterogeniczność warunków mikrosiedliskowych, dla których charakterystyczne są duże ilości silnie nasłonecznionego martwego drewna oraz przesuszona gleba i ściółka. Procesy akumulacji i rozkładu martwej materii organicznej ulegają modyfikacji, co skutkuje przekształceniem ekosystemów leśnych. Nie pozostaje to bez wpływu na zasiedlające je mikroorganizmy glebowe (Ulanowa 2000). W ekosystemach lądowych warunki edaficzne, drobnoustroje glebowe oraz szata roślinna pozostają w ścisłej współzależności. Tworzenie się odpowiednich zespołów drobnoustrojów glebowych i formacji roślinnych determinowane jest właściwościami fizycznymi i chemicznymi gleby. Mikrobiologiczne procesy mineralizacji materii organicznej gwarantują utrzymanie niezbędnego do rozwoju roślin zapasu makroskładników, stąd uważa się, że ich

aktywność ściśle wiąże się z żyznością i produktywnością ekosystemu. Ponadto biomasa drobnoustrojów jest magazynem i źródłem pokarmu dla roślin, stanowiąc jeden z głównych czynników determinujących żyzność gleb (Leiros et al. 2000; Baldrian et al. 2010). Aktywność biologiczną gleb uważa się za dobry wskaźnik ich jakości. Aktywność enzymatyczna pozwala na określenie tempa regeneracji gleb na obszarach po huraganie. Niewiele wiadomo o aktywności enzymatycznej gleb we wczesnych fazach funkcjonowania ekosystemu po powstaniu wiatrołomu oraz o dynamice w późniejszym okresie.

Celem badań było określenie intensywności przemian biochemicznych na podstawie oznaczeń aktywności ureazy i dehydrogenaz w glebach drzewostanów sosnowych, o różnym stopniu uszkodzenia i zagospodarowania po huraganie.

2. Obszar badań

Badania aktywności enzymatycznej gleb prowadzono w latach 2005 i 2013 w wybranych drzewostanach Nadleśnictwa Pisz, które położone jest w północno-wschodniej

części Polski (21°38'–22°03'E; 53°28'–53°46'N). Lasy Nadleśnictwa Pisz wchodzą w skład Puszczy Piskiej. Zgodnie z „Regionalizacją przyrodniczo-leśną Polski 2010” obszar Nadleśnictwa Pisz leży w II Krainie przyrodniczo-leśnej Mazursko-Podlaskiej, mezoregionie Puszczy Mazurskich (II.4) – w całości obrębu Szeroki Bór i Wilcze Bagno oraz we fragmencie obrębu Pisz i Dłutowo, mezoregionie Wielkich Jezior Mazurskich (II.3) – części obrębu Pisz oraz mezoregionie Pojezierza Ełckiego (II.6) – części obrębu Dłutowo (Zielony, Kliczkowska 2010). Gleby są pochodzenia polodowcowego i są to zazwyczaj piaski, sandry i gliny zwałowe. Największy obszar zajmuje typ gleb rdzawych, a w nim podtyp gleb rdzawych bielcowych. W lasach Nadleśnictwa Pisz gatunkiem panującym jest sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.).

W lipcu 2002 roku w Polsce pn.-wsch. wystąpił huragan, łamiąc i wywracając drzewa na łącznej powierzchni 33 000 ha. Większość zniszczonych drzewostanów uprzętnięto i odnowiono, jednak 445 ha lasu w Nadleśnictwie Pisz pozostawiono w stanie nienaruszonym do celów badawczych. Powierzchnie badawcze były zróżnicowane pod względem stopnia uszkodzenia drzewostanu, a także sposobu zagospodarowania po huraganie. W strefie, gdzie uszkodzenia drzewostanu nie przekraczały 10%, założono 12 powierzchni, w drzewostanach uszkodzonych w 11–50% – 11 powierzchni, w strefie z ponad 90% uszkodzeniem drzewostanów – 10 powierzchni. W celach porównawczych założono 5 powierzchni na uprawie odnowionej sztucznie z sadzenia w następnym roku po wystąpieniu huraganu. Każda z założonych powierzchni miała 100 m² (tab. 1).

3. Materiał i metody badań

Do badań aktywności enzymatycznej pobrano próby glebowe z poziomu organicznego (O) i próchnicznego (A) na powierzchniach „Szast”. Na uprawie pobrano w latach 2005 i 2013 próbki mieszane z rzędu i międzyrzędzia, które obejmowały poziom wierzchni gleby mineralnej do głębokości

5 cm. Poza tym w 2013 roku pobrano próbę mieszaną z rzędu i międzyrzędzia z tworzącego się poziomu organicznego. Oznaczenia aktywności enzymatycznej gleb wykonano po przesianiu powietrznie suchych prób glebowych przez sito o średnicy oczek 2 mm. Badania enzymatyczne obejmowały pomiar aktywności ureazy, którą oznaczono metodą kolorymetryczną, wyrażając aktywność w mg N-NH₄ na 10 g gleby w ciągu 48 h. Dehydrogenazy oznaczono metodą kolorymetryczną, wyrażając ich aktywność w mg trifenyloformazanu (TPF) na 10 g gleby w ciągu 24 h (Russel 1972).

Średnie z wyników aktywności enzymatycznej gleb zostały porównane parami w poszczególnych blokach powierzchni. W tym celu zastosowano test t-studenta dla par obserwacji przy poziomie $p < 0,05$, a różnicowanie pomiędzy badanymi powierzchniami określono stosując test Kruskala-Wallisa. Wszystkie analizy statystyczne wykonano przy użyciu pakietu *STATISTICA* ver. 6.0 (StatSoft, Inc. 1997).

4. Wyniki

Aktywność enzymów glebowych – ureazy i dehydrogenaz – była ściśle związana z zawartością substancji organicznej, co przejawiało się ich wyższą aktywnością w poziomie organicznym (O) niż próchnicznym (A) (ryc. 1–4).

Aktywność ureazy była najwyższa w glebach na uprawie założonej rok po huraganie, natomiast najniższą aktywność stwierdzono w drzewostanie silnie uszkodzonym nieuprzętniętym (DrN), zarówno w poziomie organicznym, jak i próchnicznym (ryc. 1–2).

Aktywność ureazy była nieznacznie wyższa w 2013 niż 2005 roku w poziomie próchnicznym na uprawie. Notowano bardzo wysoką aktywność ureazy w roku 2013 w tworzącym się poziomie organicznym, którego nie było w 2005 roku.

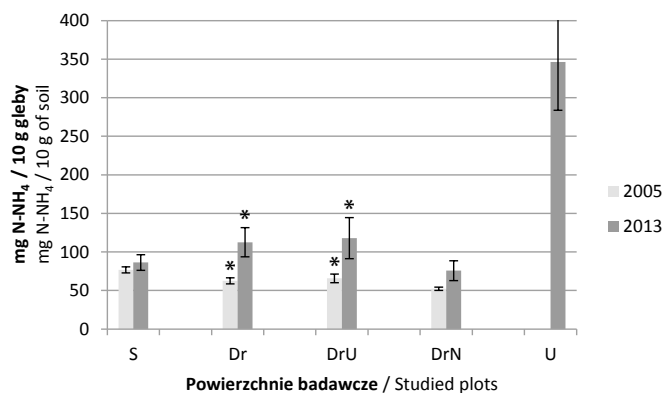
Aktywność ureazy była wyższa w 2013 niż 2005 roku we wszystkich drzewostanach lasu ochronnego „Szast” i w obu poziomach. W drzewostanie słabo uszkodzonym (S) aktywność ureazy była istotnie ($t=4,06$) wyższa w 2013 niż

Tabela 1. Obiekty badawcze na powierzchniach pohuraganowych w Puszczy Piskiej

Table 1. Research plots on blowdown area in Piska forest

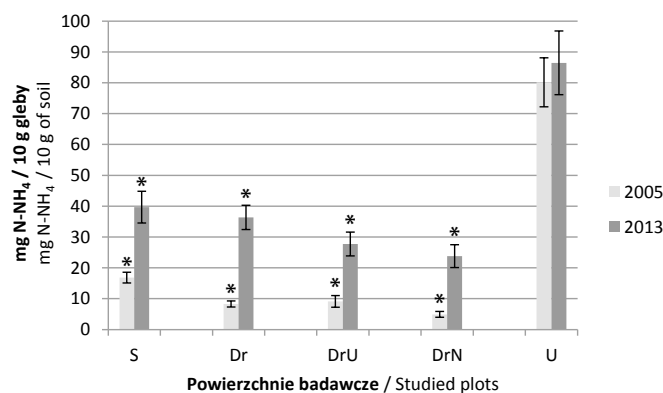
Położenie Localization	Oddział Compartment	Sposób zagospodarowania i stopień uszkodzenia drzewostanu Type of management and level of stand damage	Skład gatunkowy Species composition	Wiek Age	STL Site type
Szast	118 d	drzewostan słabo uszkodzony (<10 %) tree stand slightly damaged (<10 %)	So	104	Bśw
Szast	104a	drzewostan umiarkowanie uszkodzony (11–50 %) tree stand moderately damaged (11–50 %)	So	54	Bśw
Szast	100a	drzewostan silnie uszkodzony z usuniętym drewnem (>90 %) tree stand severely damaged with removed wood (>90 %)	So	52	Bśw
Szast	99b	drzewostan silnie uszkodzony z pozostawionym drewnem (>90%) tree stand severely damaged with left wood (>90%)	So	55	Bśw
Jeże	113	uprawa / cultivation	So	12	Bśw

So – pine, Bśw – fresh coniferous forest



Rycina 1. Zmiany aktywności ureazy poziomu organicznego na powierzchniach badawczych ± błąd standardowy. Istotne różnice pomiędzy średnimi z lat 2005 i 2013 przy $p < 0,05$ oznaczono *, S – drzewostan słabo uszkodzony, Dr – drzewostan umiarkowanie uszkodzony, DrU – drzewostan silnie uszkodzony z usuniętym drewnem, DrN – drzewostan silnie uszkodzony z pozostawionym drewnem, U – uprawa.

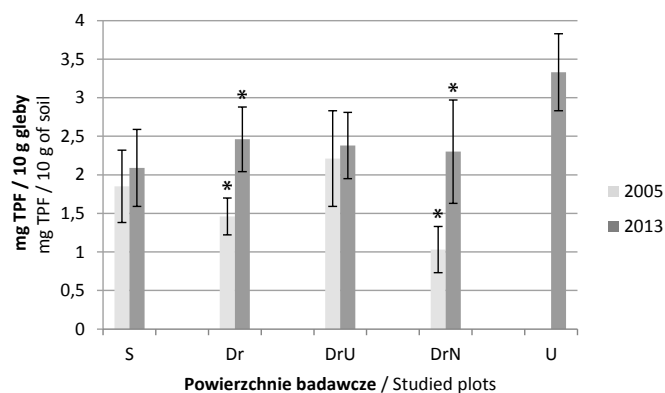
Figure 1. Changes of the urease activity of the organic horizon on research plots ± standard error. Significant differences between averages from 2005 and 2013 were marked * at $p < 0.05$, S – tree stand slightly damaged, Dr – tree stand moderately damaged, DrU – tree stand severely damaged with removed wood, DrN – tree stand severely damaged with left wood, U – cultivation.



Rycina 2. Zmiany aktywności ureazy poziomu próchnicznego na powierzchniach badawczych ± błąd standardowy. Istotne różnice pomiędzy średnimi z lat 2005 i 2013 przy $p < 0,05$ oznaczono *. Oznaczenia jak na rycinie 1.

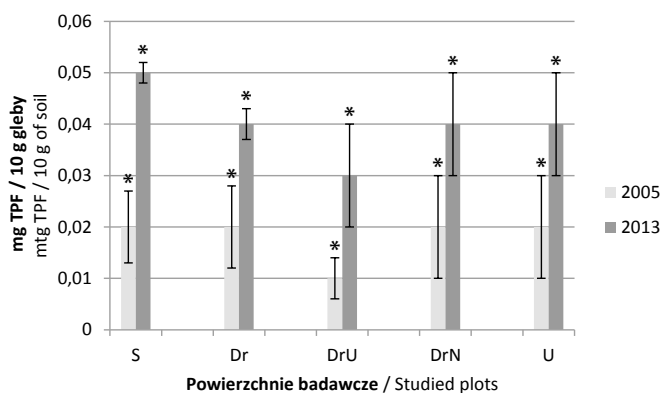
Figure 2. Changes of the urease activity of the humus horizon on research plots ± standard error. Significant differences between averages from 2005 and 2013 were marked * at $p < 0.05$. Designation as in Figure 1.

w 2005 roku w poziomie próchnicznym. Natomiast w drzewostanie umiarkowanie uszkodzonym (Dr) istotne różnice notowano zarówno w poziomie organicznym ($t=2,7$), jak i próchnicznym ($t=7,9$). W drzewostanie silnie uszkodzonym uprzętniętym (DrU) oraz w drzewostanie silnie uszkodzonym nieuprzętniętym (DrN) istotnie ($t=4,5$) wyższą aktywność ureazy stwierdzono w 2013 niż 2005 roku w poziomie próchnicznym (ryc. 2).



Rycina 3. Zmiany aktywności dehydrogenaz poziomu organicznego na powierzchniach badawczych ± błąd standardowy. Oznaczenia jak na rycinie 1.

Figure 3. Changes of the dehydrogenases activity of the organic horizon on research plots ± standard error. Significant differences between averages from 2005 and 2013 were marked * at $p < 0.05$. Designation as in Figure 1.



Rycina 4. Zmiany aktywności dehydrogenaz poziomu próchnicznego na powierzchniach badawczych ± błąd standardowy. Oznaczenia jak na rycinie 1.

Figure 4. Changes of the dehydrogenases activity of the humus horizon on research plots ± standard error. Significant differences between averages from 2005 and 2013 were marked * at $p < 0.05$. Designation as in Figure 1.

Podobnie do zmian aktywności ureazy kształtowały się zmiany aktywności dehydrogenaz. Na obszarach naturalnej regeneracji lasu aktywność dehydrogenaz była wyższa w 2013 niż w 2005 roku w obu badanych poziomach. Na uprawie aktywność dehydrogenaz była dwukrotnie wyższa w 2013 niż 2005 roku w poziomie próchnicznym. Podobnie jak w przypadku ureazy aktywność dehydrogenaz była najwyższa w tworzącym się na uprawie poziomie organicznym w 2013 roku. (ryc. 3–4).

W poziomie organicznym istotnie ($t=2,56$) wyższą aktywność dehydrogenaz stwierdzono w drzewostanie umiarkowanie uszkodzonym (Dr) oraz ($t=2,02$) w drzewostanie silnie uszkodzonym nieuprzętniętym (DrN) (ryc. 3). W drzewostanie słabo uszkodzonym (S) aktywność dehydrogenaz

wzrosła istotnie ($t=3,44$) w poziomie próchnicznym. Istotnie ($t=3,55$) wyższą aktywność stwierdzono w poziomie (A) w drzewostanie silnie uszkodzonym uprzątniętym (DrU) oraz ($t=4,5$) w drzewostanie silnie uszkodzonym nieuprzątniętym (DrN) (ryc. 4).

5. Dyskusja

Oceniając aktywność biologiczną gleb, przetestowano powszechnie stosowane parametry, które związane są z podstawową rolą drobnoustrojów w glebach leśnych, a mianowicie z procesami mineralizacji substancji organicznej. Aktywność badanych enzymów była ściśle związana z zawartością substancji organicznej, czego dowodem była ich statystycznie wyższa aktywność w poziomach organicznych niż próchnicznych gleb badanych drzewostanów. Liczne dane literaturowe (Leirós et al. 2000; Šnajdr et al. 2008; Zwoliński 2008; Olszowska 2010) potwierdzają ścisły związek aktywności enzymatycznej i rozwoju drobnoustrojów z zawartością węgla organicznego, który jest ich podstawowym substratem energetycznym.

Wiatrołom modyfikuje warunki środowiska glebowego, zmienia mikroklimat gleby, a wzrost temperatury gleby prowadzi do wzrostu tempa rozkładu materii organicznej (Hyvönen et al. 2005). Istnieją liczne prace dokumentujące zmianę bilansu węgla w glebach jako skutek zmiany użytkowania terenu, głównie deforestacji, m.in. Guo i Gifford (2002), Laganière i in. (2010), podczas gdy prace analizujące ten problem w wyniku wystąpienia nagłych zdarzeń o charakterze klęsk elementarnych są bardzo nieliczne. Z danych literaturowych wynika, że dotychczas niewiele jest badań aktywności enzymatycznej gleb na obszarach po huraganach. Badania Błońskiej i Lasoty (2014) wskazują na istotnie niższą aktywność dehydrogenaz i ureazy na powierzchniach po wiatrołomie, który zakłócił równowagę biologiczną środowiska glebowego. Prace Kramera i in. (2004) oraz Thürig i in. (2005) przedstawiają głównie wyniki badań dotyczące spadku zawartości węgla organicznego po kilkudziesięciu latach od powstania wiatrołomu. Również badania Dona i in. (2012) dotyczą zmiany zawartości węgla organicznego w poszczególnych poziomach genetycznych gleby od momentu wystąpienia huraganu. Bardzo mało wiadomo o aktywności enzymatycznej gleb we wczesnych fazach funkcjonowania ekosystemu po powstaniu wiatrołomu. Niniejsze badania wskazują, że aktywność badanych enzymów podlegała wahaniom związanym ze stopniem uszkodzenia drzewostanów i ich zwarciem oraz sposobem zagospodarowania, które miały wpływ na zróżnicowanie wilgotności, temperatury i natlenienia gleby. Aktywność ureazy i dehydrogenaz była związana z wiekiem drzewostanu, w młodszym drzewostanie przemiany substancji organicznej są intensywniejsze, co przejawia się w najwyższej aktywności badanych enzymów glebowych na uprawie. Również na powierzchniach z drzewostanem umiarkowanie uszkodzonym nieuprzątniętym aktywność dehydrogenaz była wysoka, co może wskazywać na wpływ pozostałości pohuraganowych na tę aktywność. Aktywność badanych enzymów nie różniła się

istotnie od siebie w ramach wszystkich drzewostanów w lesie ochronnym „Szast” w roku 2005. Jednocześnie analiza aktywności enzymatycznej gleb w 2013 r. wskazuje na kierunek przemian biochemicznych na powierzchniach doświadczalnych z różnymi zabiegami. Prześwietlenie drzewostanu w lesie ochronnym „Szast” spowodowało wzrost aktywności enzymatycznej. Aktywność ureazy i dehydrogenaz była wyższa w 2013 niż w 2005 roku na obszarach naturalnej regeneracji lasu, co może wskazywać na poprawę warunków siedliskowych. Podobnie w badaniach Gömöryová i in. (2011, 2014) na wszystkich poletkach pohuraganowych badane parametry mikrobiologiczne oraz aktywność katalazy wykazały istotny wzrost, co wskazuje na stopniowe ożywienie drobnoustrojów glebowych.

Ze względu na szybszą, w porównaniu z organizmami wyższymi, reakcję drobnoustrojów na czynniki zewnętrzne, poprzedzającą zazwyczaj dostrzegalne zmiany właściwości chemicznych i fizycznych gleb, pomiar parametrów biochemicznych pozwala na wczesną ocenę poprawy jakości gleb. Zarówno w 2005, jak i 2013 roku wystąpiły istotne różnice pomiędzy uprawą a wszystkimi obiektami lasu ochronnego „Szast”. W wyniku sztucznego zagospodarowania terenów pohuraganowych – uprawa, nastąpiły też istotne zmiany w aktywności badanych enzymów glebowych, które utrzymują się wyraźnie po jedenastu latach od momentu wystąpienia huraganu. W tym czasie warunki siedliskowe uległy przekształceniom, co przejawiało się najwyższą aktywnością enzymatyczną, która została zaobserwowana na powierzchniach zagospodarowanych sztucznie – uprawie i do dziś ta różnica jest nadal widoczna.

Jednocześnie aktywność enzymatyczna, jak wskazują badania Dinesh i in. (2004), Nourbakhsh (2007), Lagomarsino i in. (2011), może być czułym wskaźnikiem wczesnych zmian warunków glebowych spowodowanych zabiegami hodowlanymi. Wskaźniki biochemiczne mogą być bardzo przydatne w badaniach porównawczych do oceny jakości gleb lub ich reakcji na czynniki zewnętrzne, zarówno naturalne, jak i antropogeniczne. Pokazały to przeprowadzone badania na obszarach pohuraganowych charakteryzujących się naturalnymi procesami oraz brakiem zabiegów gospodarczych. Przemawia to za szerszym wykorzystaniem wskaźników biochemicznych w badaniach gleb leśnych, zwłaszcza przy ocenie wpływu czynników stresowych (np. wiatrołomów, pożarów czy zanieczyszczeń przemysłowych), zmian klimatycznych oraz zabiegów hodowlanych na lasy, a także w prognozowaniu dalszego ich rozwoju. Kontynuacja badań z zakresu aktywności enzymów, pozwoli na dalsze obserwacje zmian parametrów w czasie, dotyczących właściwości biochemicznych gleb na obszarach pohuraganowych.

6. Podsumowanie

Aktywność enzymów była ściśle związana z zawartością substancji organicznej, czego dowodem była ich wyższa aktywność w poziomach organicznych niż próchnicznych gleb badanych obiektów.

Aktywność ureazy i dehydrogenaz była wyższa w 2013 niż w 2005 roku na obszarach naturalnej regeneracji lasu, co może wskazywać na poprawę warunków siedliskowych.

Wartości badanych parametrów biochemicznych pozostawały w ścisłym związku ze sposobem odnowienia lasu, korzystniejszy wpływ na tempo regeneracji gleb ma odnowienie sztuczne niż naturalne.

Zmiany aktywności enzymatycznej gleb były skorelowane zarówno ze stopniem uszkodzenia drzewostanów, jak i sposobem zagospodarowania terenów po wystąpieniu huraganu.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania przeprowadzono w ramach projektu sfinansowanego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych BLP-359.

Literatura

- Baldrian P., Merhautová V., Cajthaml T., Petránková M., Šnajdr J. 2010. Small-scale disturbance of extracellular enzymes, fungal, and bacterial biomass in *Quercus petraea* forest topsoil. *Biology and Fertility of Soils* 46: 717–726.
- Błońska E., Lasota J. 2014. Biological and biochemical properties in evaluation of forest soil quality. *Folia Forestalia Polonica* 56(1): 23–29.
- Dinesh R., Ghoshal Chaudhuri S., Shee J. T. E. 2004. Soil biochemical and microbial indices in wet tropical forests: Effects of deforestation and cultivation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167(1): 24–32.
- Dobrowolska D. 2007. Odnowienie naturalne lasu w drzewostanach uszkodzonych przez wiatr na terenie północno-wschodniej Polski. *Leśne Prace Badawcze* 2: 45–60.
- Don A., Bärwolff M., Kalbitz K., Andruschkewitsch R., Jungkunst H.F., Schulze E.D. 2012. No rapid soil carbon loss after a windthrow event in the High Tatra. *Forest Ecology and Management* 276: 239–246.
- Gömöryová E., Fleischer P., Gömöry D. 2014. Soil microbial community responses to windthrow disturbance in Tatra National Park (Slovakia) during the period 2006–2013. *Lesnický časopis / Forestry Journal* 60: 137–142.
- Gömöryová E., Strelcová K., Fleischer P., Gömöry D. 2011. Soil microbial characteristics at the monitoring plots on windthrow areas of the Tatra National Park (Slovakia): their assessment as environmental indicators. *Environmental Monitoring and Assessment* 174: 31–45. DOI: 10.1007/s10661-010-1755-2.
- Guo L.B., Gifford R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a metaanalysis. *Global Change Biology* 8(4): 345–360.
- Hyvönen R., Łgren, G.I., Dalias P. 2005. Analysing temperature response of decomposition of organic matter. *Global Change Biology* 11: 770–778.
- Kramer M.G., Sollins P., Sletten R.S. 2004. Soil carbon dynamics across a windthrow disturbance sequence in southeast Alaska. *Ecology* 85: 2230–2244.
- Laganière, J., Angers D.A., Paré, D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology* 16: 439–453.
- Lagomarsino A., Benedetti A., Marinari S., Pompili L., Moscatelli M.C., Roggero P.P., Lai R., Ledda L., Grego S. 2011. Soil organic C variability and microbial functions in a Mediterranean agro-forest ecosystem. *Biology and Fertility of Soils* 47: 283–291.
- Leiros M.C., Trasar-Cepeda C., Seoane S., Gil-Sotres F. 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): General parameters. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 733–745.
- Nourbakhsh F. 2007. Decoupling of soil biological properties by deforestation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121: 435–438.
- Olszowska G. 2010. Rozkład pionowy aktywności enzymatycznej gleb różnych siedlisk leśnych. *Sylwan* 154(6): 405–411.
- Russel S. 1972. Metody oznaczania enzymów glebowych. PTG Komisji Biologii Gleby. Warszawa, 64 s.
- StatSoft, Inc. 1997. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. Tulsa.
- Šnajdr J., Valášková V., Merhautová V., Herinková J., Cajthaml T., Baldrian P. 2008. Spatial variability of enzyme activities and microbial biomass in the upper layers of *Quercus petraea* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 40: 2068–2075. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.01.015.
- Thürig E., Palosuo T., Bucher J., Kaufman E. 2005. The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: A model-based assessment. *Forest Ecology and Management* 210: 227–250.
- Ulanova N.G. 2000. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a Review. *Forest Ecology and Management* 135: 155–167. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00307-8.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. ISBN 978-83-61633-62-4.
- Zwoliński J. 2008. Rozkład pionowy biomasy drobnoustrojów w glebach leśnych. *Leśne Prace Badawcze* 69(3): 225–231.