

Wpływ antropopresji na asymetrię fluktuacyjną igieł sosny zwyczajnej

Agnieszka Bęś¹, Kazimierz Warmiński¹, Adam Błaszczok¹,
Anna Roczeń¹, Karolina Rutkowska¹

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Chemii, Zespół Toksykologii Środowiska, ul. Prawocheńskiego 17, 10-720 Olsztyn

* Autor do korespondencji: agnieszka.bes@uwm.edu.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wykorzystania igieł sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) jako biomarkera. Do oceny wpływu antropopresji na drzewostany sosny zwyczajnej wybrano wskaźniki asymetrii fluktuacyjnej (FAM i FAL) igieł. Materiał roślinny do badań pobrano z drzewostanów sosnowych rosnących przy drodze o dużym natężeniu ruchu, zakładzie petrochemicznym oraz składowisku odpadów innych niż obojętne i niebezpieczne. Przeprowadzone analizy wykazały istotne różnice w wartościach wskaźników asymetrii fluktuacyjnej (FA) igieł pobranych z drzewostanów rosnących najbliżej drogi szybkiego ruchu oraz składowiska odpadów komunalnych. Wraz ze zwiększaniem odległości od źródła zanieczyszczenia wartość wskaźników FAM i FAL malała. W świetle przeprowadzonych badań można uznać, iż wskaźnik asymetrii fluktuacyjnej (FA) igieł sosny zwyczajnej można zastosować do oceny wpływu antropopresji na drzewostany sosnowe jako uzupełniający dotychczas wykorzystywany.

Słowa kluczowe: bioindykator, sosna zwyczajna, igły, zanieczyszczenia, stres środowiskowy, czynniki antropogeniczne

The impact of human pressure on the fluctuating asymmetry of Scots pine needles

ABSTRACT

This paper presents the results of a study investigating the use of Scots pine needles as bioindicators. The impact of human pressure on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands was evaluated based on two indicators (FAM and FAL) of the fluctuating asymmetry (FA) of needles. The samples of plant material were collected from the Scots pine stands in the immediate vicinity of a road with high traffic intensity, a petroleum refinery and a landfill site for non-hazardous and inert wastes. The analysis revealed significant differences in the FA of needles collected from the stands beside the freeway and the municipal landfill site. The values of FAM and FAL decreased with an increasing distance from the pollution sources. The results of this study indicate that the FA of Scots pine needles could be a reliable indicator for assessing the impact of human pressure on Scots pine stands, complementary to those used traditionally.

Keywords: bioindicator, Scots pine, needles, pollutions, environmental stress, anthropogenic factors

WSTĘP

Asymetria fluktuacyjna (ang. fluctuating asymmetry – FA) jest to odstępstwo od obustronnej symetrii. Asymetria może objawiać się jako drobne, przypadkowe odchylenia w wiel-

kości i kształcie danej cechy, nie wykazujące tendencji do występowania częściej lub silniej po jednej ze stron lub jako większe odstępstwa w budowie organizmów. Podczas występowania zaburzeń w środowisku, powodowanych przez czynniki antropopresji, pewne cechy

mogą zostać wykształcona asymetrycznie. Asymetrię bada się u ssaków, ryb, ptaków, a także roślin. Przyczyny FA mogą być różne, ogólnie można je podzielić na środowiskowe lub warunkowane genetycznie [Hardersen 2000; Fair, Breshears 2005; Pérez-Contreras et al. 2008; Graham et al. 2010].

Przy ocenie stanu środowiska wykorzystuje się, jako wskaźnik żywe organizmy (bioindykatory), których reakcja na dostarczone związki pozwala na określenie rzeczywistego wpływu substancji zanieczyszczających. Bioindykacji używa się podczas oceny stanu lasów narażonych na działania antropogeniczne [Zimny 2006; Dynowska and Ciecierska 2013]. Za indikator stanu środowiska można uznać, jak podają Czerniak et al. [2009], Jaworska et al. [2010], Parzych i Sobisz [2012], Chudzińska et al. [2014] i Świercz et al. [2014] igły sosny zwyczajnej, pospolicie występującej na terenie Polski. Stopień asymetrii fluktuacyjnej jest wskaźnikiem wykorzystywanym do określenia stanu zdegradowanego czynnikiem antropogenicznym środowiska leśnego [Kluz and Sznajder 1998; Otronen and Rosenlund 2001; Błocka and Staszewski 2007; Graham et al. 2012]. Wysoka wrażliwość asymetrii fluktuacyjnej igieł sosny na działanie stresorów umożliwiła uznanie FA jako dobrego wskaźnika ekologicznego, który można zastosować jako jeden ze wskaźników oceny stanu zdrowotnego sosny zwyczajnej [Staszewski and Błocka 2007]. Wartość wskaźnika FA oblicza się dzieląc różnicę w długości igieł tej samej pary przez średnią długość igieł w parze (FAL) lub różnicę w masie igieł przez średnią masę igieł w parze (FAM) [Kozlov and Niemelä 1999]. Pomiar asymetrii fluktuacyjnej igieł sosnowych znajdują zastosowanie zarówno na terenach o dużym skażeniu [Chudzińska et al. 2014; Makarenko et al. 2016], jak i w miejscach nieznacznie zanieczyszczonych [Kozlov et al. 2002]. Asymetrię fluktuacyjną igieł sosny wykorzystać można też w ocenie skuteczności prowadzonych zabiegów rekultywacyjnych na terenach skażonych [Bajorek-Zydroń et al. 2007; Makarenko et al. 2016]. Na FA igieł wpływ mają głównie zanieczyszczenia powietrza: dwutlenek siarki, tlenki azotu, kwaśne deszcze oraz występujące w glebach metale ciężkie (Cu, Zn, Pb, Ni) pochodzące z przemysłu górniczego, hutniczego, transportu czy składowania odpadów [Kozlov et al. 2009; Wiater 2011]. Jak podają Chudzińska et al. [2014] wysoka wartość FA świadczy o

występowaniu czynników stresowych, jest tym większa im większe było skażenie. Na wartość wskaźnika asymetrii fluktuacyjnej igieł sosnowych wpływa także odległość od źródła zanieczyszczeń. W badaniach nad wpływem emisji zanieczyszczeń przemysłowych na stan zdrowotny sosny zwyczajnej Kozlov et al. [1999] wykazali zależność pomiędzy wskaźnikiem asymetrii fluktuacyjnej igieł sosny zwyczajnej a odległością od emitora zanieczyszczeń.

W polskiej literaturze brakuje badań dotyczących wykorzystania wskaźników asymetrii igieł sosny zwyczajnej do oceny wpływu antropopresji na drzewostany sosnowe. Celem pracy była próba oceny reakcji sosny zwyczajnej na stres środowiskowy wywołany czynnikami antropogenicznymi z wykorzystaniem wskaźników asymetrii fluktuacyjnej (FAM i FAL).

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

W pracy analizowano wpływ antropopresji środowiska – zanieczyszczeń emitowanych na terenach o dużym nasileniu ruchu samochodowego, z zakładu petrochemicznego oraz składowiska odpadów innych niż obojętne i niebezpieczne, na drzewostan sosnowy. Do badań wybrano sosny zwyczajne rosnące w różnych odległościach od emitatorów zanieczyszczeń w celu wskazania czy odległość od potencjalnego źródła antropopresji ma wpływ na zmiany wartości wskaźników asymetrii fluktuacyjnej oraz odchylenia w długości i masie igieł sosnowych pozyskanych z wybranych drzew. W pracy nie porównywano wyników uzyskanych dla wybranych stanowisk badawczych ze względu na różne czynniki antropogeniczne mogące wpływać na drzewostan sosnowy.

Badania prowadzono w zbiorowiskach leśnych Nadleśnictwa Kudypy (województwo warmińsko-mazurskie) oraz w zadrzewieniach rosnących w okolicach zakładu petrochemicznego PKN Orlen (województwo mazowieckie). Kontrolne próby igieł pobierano z miejsc wolnych od wpływu zanieczyszczeń. Materiał porównawczy zbierano tego samego dnia kiedy pobierano igły z poszczególnych stanowisk badawczych. Igły stanowiące kontrolę pobierano z drzew równowiekowych, położonych w środku powierzchni leśnych. Wszystkie igły pobierano jesienią w latach: 2009, 2010 i 2013. Do badań wybrano trzy stanowiska badawcze:

1. Zbiorowisko leśne w Leśnictwie Kudypyki (Nadleśnictwo Kudypy, RDLP w Olsztynie) przez które przechodzi droga krajowa nr 16 (53°76'93,39"N, 20°38'20,23"E). Średnie natężenie ruchu samochodowego na wybranym odcinku w 2010 r wynosiło 10174 pojazdów silnikowych (w tym 7862 samochody osobowe, 1418 samochodów ciężarowych) [GDDKIA 2010]. Wybrane do badań sosny zwyczajne należały do I klasy wieku (do 20 lat). Igły pobrano z sosen rosnących w odległości 50, 250, 2000 i 3000 m od drogi krajowej nr 16 (DK16). Były to drzewostany sześć- i dziesięcioletnie. Na każdej powierzchni losowo wybrano trzy sosny zwyczajne reprezentujące dany drzewostan. Z wybranych drzew pozyskano pędy jednoroczne, a następnie pobrano po 20 par igieł z każdego drzewa. Igły pobrano ze wszystkich powierzchni tego samego dnia podczas panowania jednakowych warunków atmosferycznych. Kontrolną próbę igieł pobrano z sosen rosnących w miejscowości Gronity (G) (w odległości 4000 m od DK16).

2. Drugie stanowisko badawcze zlokalizowano w okolicach przedsiębiorstwa PKN Orlen w Płocku (52°35'03,5"N 19°41'17,9"E) zajmującego się przetwarzaniem ropy naftowej oraz dystrybucją produktów ropopochodnych, takie jak: olej opałowy, benzyna, gaz. Igły sosnowe pobierano z drzew rosnących w odległości: 100, 1500, 10000 i 15000 m od zakładu. W każdym z oznaczonych miejsc wybrano 5 równoległych sosen w drugiej klasie wieku (21–40 lat). Igły pobierano w ciągu dwóch dni w zbliżonych warunkach meteorologicznych – temperatura, wilgotność, ciśnienie. Z każdej sosny pobrano po 40 par igieł. Dwadzieścia par pobrano z pędów jednorocznych, dwadzieścia z pędów dwuletnich. Jako materiał porównawczy pobrano igły z dwóch obiektów, potencjalnie nie objętych wpływem zanieczyszczeń przemysłowych:

- w odległości 20 000 m – Brudzeński Park Krajobrazowy (BPK)
- w odległości 184 000 m miejscowość Trękus (T).

3. Stanowisko trzecie usytuowane było przy składowisku odpadów komunalnych w Dywitach (53°49'21,6"N 20°27'21,6"E). Składowisko powstało na terenie po byłym wyrobisku żwiru z trzech stron otoczone jest lasem. Eksploatację składowiska rozpoczęto w 1991 r. a zakończono w 2007 r. Było to składowisko nadpoziomowe bez sztucznej warstwy uszczelniającej podłoże, na którym składowano odpady komunalne z tere-

nu gminy Dywity. Powierzchnia składowania odpadów wynosiła ok. 2,4 ha miąższość zalegania odpadów 2–3 m, a na niewielkiej powierzchni 5 m. Igły pobierano z sosen rosnących w odległości: 1, 5, 10 i 15 metrów od wyznaczonej granicy składowiska. W miejscu poboru wybrano 5 równoległych sosen w drugiej klasie wieku (21–40 lat), igły pobierano z pędów jednorocznych i dwuletnich (po 20 par igieł). Kontrolną próbę igieł pobrano z sosen rosnących w miejscowości Brąswałd (B) (w odległości 5000 m).

Po zebraniu i zabezpieczeniu materiału roślinnego w laboratorium wybierano po 10 par igieł i naklejano je na odpowiednio oznakowane kartony, które sfotografowano i zeskanowano. Zeskanowane obrazy igieł poddano komputerowej analizie obrazu przy pomocy programu Lucia 5.0. Mierzono różnicę długości pomiędzy igłami pochodzącymi z jednej pary z dokładnością do $\pm 1 \mu\text{m}$ oraz długość obu igieł. Następnie igły suszono w temperaturze 60°C przez 1 dobę. Po wysuszeniu igły ważono, każdą igłę z pary oddzielnie. Na podstawie uzyskanych pomiarów (średnich długości i średnich mas) wyliczono wskaźniki asymetrii fluktuacyjnej igieł sosny – FAL i FAM. Analizie poddano również średnie długości i średnie masy igieł.

Wyniki badań opracowano przy pomocy programu STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc. 2016). Wyniki uzyskane z badań poddano analizie wariancji ANOVA (test F) dla układów czynnikowych. Istotne różnice określono testem Tukeya przy poziomie istotności $p=0,01$. Wyniki testu post-hoc przedstawiono w formie grup jednorodnych, które w tabelach i na rysunkach oznaczono odpowiednimi literami. Opracowując wyniki uzyskane dla stanowiska badawczego zlokalizowanego w pobliżu PKN Orlen oraz składowiska odpadów w Dywitach analizowano dwa czynniki doświadczenia: odległość miejsca poboru igieł od emitora zanieczyszczeń oraz wiek igieł (jednoroczne i dwuletnie). W przypadku wpływu DK16 określono jedynie wpływ odległości od źródła zanieczyszczeń na wskaźniki asymetrii fluktuacyjnej FAL i FAM igieł sosny zwyczajnej. Przed przystąpieniem do analiz statystycznych testem Shapiro-Wilka sprawdzono normalność rozkładu cechy w obrębie każdej grupy niezależnej i dodatkowo zweryfikowano to analizą normalności reszt. Testem Levene'a potwierdzono założenie jednorodności wariancji.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Przeprowadzona analiza wariancji wykazała, że wartości wskaźników asymetrii fluktuacyjnej, długość igieł oraz ich masa były związane z odległością drzew sosny zwyczajnej od drogi o dużym natężeniu ruchu (DK 16) (tabela 1).

Uzyskane wyniki pozwoliły na wykazanie znacznego zróżnicowania wskaźnika FAL igieł sosny zwyczajnej pozyskanych z drzew rosnących w różnych odległościach od drogi szybkiego ruchu. Najwyższą wartość wskaźnika FAL odnotowano dla igieł sosny zwyczajnej pobranych z transektów położonych najbliżej emitora – czyli w odległości 50 i 250 m od drogi krajowej nr 16. Średnia wartość FAL dla igieł pobranych z sosen rosnących 50 m od DK16 wyniosła 0,058 a dla igieł pobranych z odległości 250 m – 0,042. Przeprowadzony test Tukeya zalicza te wartości do jednej grupy jednorodnej, a więc są one na zbliżonym statystycznie poziomie. Istotnie niższą wartością wskaźnika FAL (0,006-0,012) charakteryzowały się igły sosnowe pobrane z drzewostanów rosnących w odległości 2000 i 3000 m od DK nr 16 oraz z drzewostanów kontrolnych (rys. 1).

Wskaźnik FAM kształtował się podobnie jak FAL. Największe wartości zanotowano dla igieł sosny pobranych z drzew rosnących najbliżej emitora zanieczyszczeń (0,082). W miarę zwiększania się

odległości od drogi wartość FAM malała. Analiza statystyczna wykazała, że wartości FAM dla odległości 2000 i 3000 m należą do jednej grupy jednorodnej i są porównywalne z wartością FAM igieł sosny uzyskaną dla igieł z obiektu kontrolnego (rys. 1).

Średnie masy i długości igieł statystycznie istotnie zależały od odległości drzewostanu od drogi o dużym natężeniu ruchu co wykazała analiza wariancji (tab. 1). Przeprowadzony test post-hoc Tukeya wykazał, że wraz ze wzrostem odległości od drogi zmniejszała się zarówno masa jak i długość igieł. Największą średnią masę odnotowano dla igieł sosen rosnących w odległości 50 m od drogi, wynosiła ona 0,003 g. Masa igieł pobranych z sosen rosnących w odległościach 250, 2000 i 3000 m różniła się statystycznie pomiędzy sobą. Najmniejszą masę miały igły sosnowe pobrane z odległości 2000 m (0,017 g).

Porównując średnie długości igieł pozyskanych z omawianego obszaru można zauważyć, że długość igieł pobranych z odległości 250, 2000 i 3000 m od DK 16 istotnie nie różni się od siebie. Średnia długość igieł pozyskanych z powierzchni leśnej położonej 4000 m od DK 16 (obiekt kontrolny) była największa i różniła się od średniej długości igieł pobranych w odległościach 50, 250 i 2000 m od emitora o 21 mm (rys. 2).

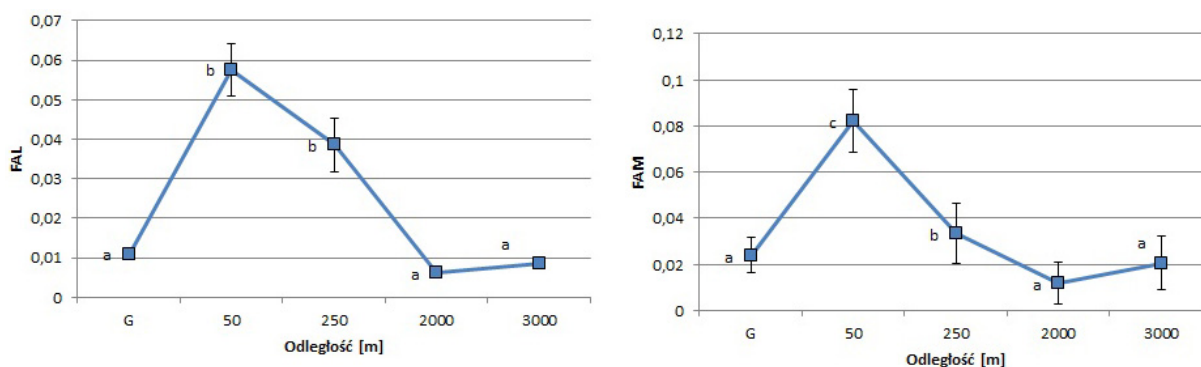
W przypadku zakładu PKN Orlen analiza wariancji uzyskanych wyników wykazała, że

Tabela 1. Analiza wariancji – DK nr 16

Table 1. Analysis of variance – DK No. 16

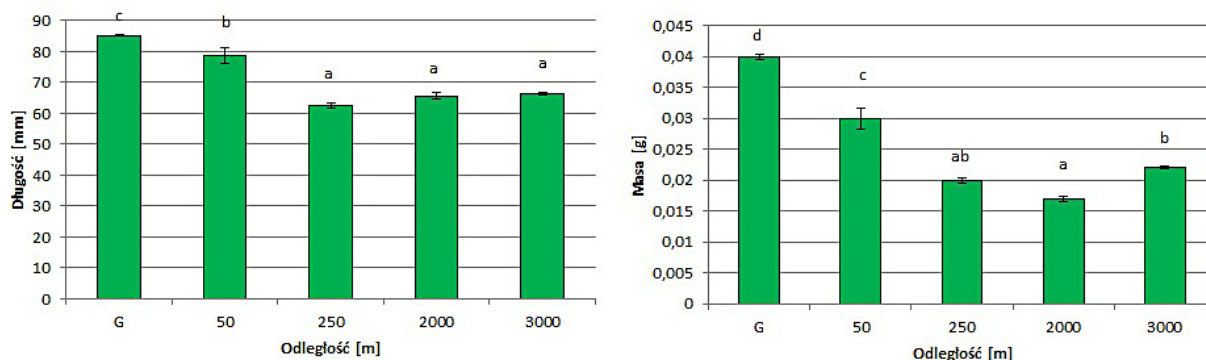
Czynniki	FAL		FAM		Średnia masa igieł		Średnia długość igieł	
	F _{emp}	p	F _{emp}	p	F _{emp}	p	F _{emp}	p
O	26,77**	<0,001	15,92**	<0,001	82,98**	<0,001	48,46**	<0,001

O – odległość od emitora, F_{emp} – wartości statystyki testu F, p – wyliczone poziomy istotności.



Rys. 1. Średnie wartości wskaźników FAM i FAL w zależności od odległości od DK16 ze słupkami średnich błędów standardowych (SE): a, b, c – grupy jednorodne (test Tukeya, poziomo istotności p=0,01), G – obiekt kontrolny (Gronity)

Fig. 1. The mean values of FAM and FAL depending on the distance from the DK16 with the standard errors (SE): a, b, c – homogenous groups (Tukey's test, significant level p=0,01), G – control object (Gronity)



Rys. 2. Średnie długości [mm] i masy [g] igieł zebranych z drzew rosnących w sąsiedztwie DK16 ze słupkami średnich błędów standardowych (SE): a, b, c – grupy jednorodne (test Tukeya, poziomo istotności $p=0,01$). G – obiekt kontrolny (Gronity)

Fig. 2. Mean length [mm] and weight [g] of Scots pine needles extracted from trees growing in the neighborhood of DK16 with the standard errors (SE): a, b, c – homogenous groups (Tukey’s test, significant level $p=0,01$), G – control object (Gronity)

wskaźnik FAL igieł sosny zwyczajnej, długość igieł oraz ich masa istotnie zależały od miejsca poboru igieł i ich wieku. Na wskaźnik FAM igieł statystycznie istotnie nie wpływał żaden z analizowanych czynników. Interakcje pomiędzy wiekiem igieł i odległością od emitora były statystycznie nieistotne dla wszystkich analizowanych parametrów (tab. 2).

Wartość wskaźnika FAL igieł sosny istotnie zależała od odległości, z której pobierano igły. Najmniejszą wartość wskaźnika FAL zanotowano dla igieł pobranych z sosen rosnących w odległości 100 i 1500 m, odpowiednio 0,761 i 0,746 (wartości te należą do tej samej grupy jednorodnej) (tab. 3, rys. 3). Wartości wskaźnika FAL dla igieł pobranych z sosen rosnących najbliższej

Tabela 2. Analiza wariancji – PKN Orlen

Table 2. Analysis of variance – PKN Orlen

Czynniki	FAL		FAM		Średnia masa igieł		Średnia długość igieł	
	F_{emp}	p	F_{emp}	p	F_{emp}	p	F_{emp}	p
O	5,24**	<0,001	0,83ns	0,5357	7,82**	<0,001	8,68**	<0,001
W	4,34*	0,0426	2,53ns	0,1184	11,93**	<0,001	9,62**	<0,001
OxW	1,08ns	0,3784	1,81ns	0,1290	0,90ns	0,4911	0,07ns	0,9963

O – odległość od emitora, W – wiek igieł, OxW – interakcja pomiędzy czynnikami.

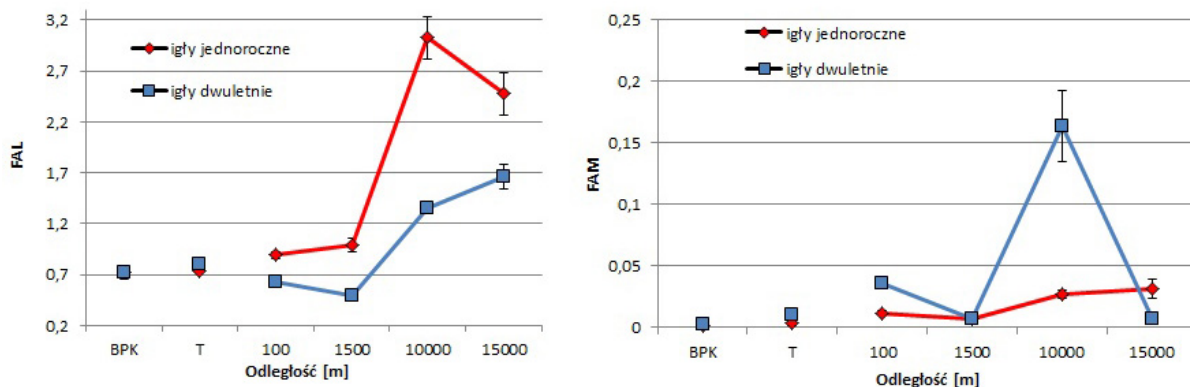
Pozostałe oznaczenia jak w tabeli 1.

Tabela 3. Wartości wskaźników FAM i FAL w zależności od odległości od PKN Orlen i wieku igieł sosny zwyczajnej

Table 3. The values of FAM and FAL depending on the distance from the PKN Orlen and the age of needles Scots pine

Czynniki		FAM	FAL
Odległość [m]	100	0,761 a	0,024 a
	1500	0,746 a	0,007 a
	10 000	2,188 c	0,095 a
	15 000	2,072 bc	0,019 a
	20 000 (Kontrola – Brudzeński Park Krajobrazowy)	0,771 ab	0,002 a
	184 000 (Kontrola – Trękus)	0,723 a	0,007 a
Wiek igieł	Igły jednoroczne	1,475 B	0,014 A
	Igły dwuletnie	0,945 A	0,038 A

Różnice pomiędzy wartościami oznaczonymi różnymi literami są statystycznie istotne na poziomie $p = 0,01$; wartości oznaczono literami (a, b, c) dla porównania wpływu odległości na wartość wskaźników FAM i FAL, oraz (A,B) dla porównania igieł jednorocznych i dwuletnich; wartości te należą do różnych grup jednorodnych (na podstawie testów post-hoc).



Rys. 3. Średnie wartości wskaźników FAM i FAL w zależności od odległości od PKN Orlen ze słupkami średnich błędów standardowych (SE): BPK, T – obiekty kontrolne (Brudzeński Park Krajobrazowy, Trękus)
Fig. 3. The mean values of FAM and FAL depending on the distance from the PKN Orlen with the standard errors (SE): BPK, T – control objects (Brudzeński Park Krajobrazowy, Trękus)

źródła są porównywalne do wartości wskaźnika otrzymanych dla igieł pobranych z punktów kontrolnych (Trękus, Brudzeński Park Krajobrazowy), wolnych od zanieczyszczeń przemysłowych. Największe wahania symetrii zanotowano dla igieł sosny pobranych z odległości 10 000 m, nieco mniejsze dla igieł pobranych z sosen rosnących w odległości 15 000 m od PKN Orlen.

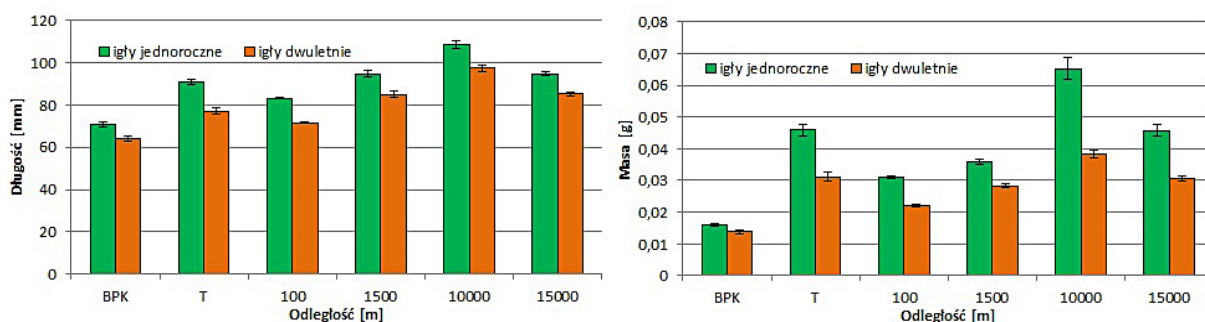
Badania wykazały statystycznie istotną wyższą wartość wskaźnika FAL igieł jednorocznych w porównaniu z igielami dwuletnimi (tab. 3).

Biorąc pod uwagę długość igieł w parze, ich wymiary zmieniały się w zależności od odległości punktu poboru od emitora (rys. 4). Najdłuższe igieł (103 mm) pobrano w odległości 10 000 m od PKN Orlen. Igieł najkrótsze pobrano z sosen, które występowały w Brudzeńskim Parku Krajobrazowym – obiekt kontrolny oddalony o 20 000 m od zakładu. Może świadczyć o najczystszej powietrzu w tym miejscu w porównaniu z innymi miejscami poboru prób. Igieł po-

brane z sosen rosnących najbliżej zakładu (odległość 100 m) oraz igieł z jednego z obiektów kontrolnych (Trękus, odległość 184 000 m od PKN Orlen) były dłuższe niż igieł z BPK (wartości należały do tej samej grupy jednorodnej).

Odległość od PKN Orlen w istotny statystycznie sposób wpływała także na średnią masę igieł. Największą masę miały igieł pobrane z sosen rosnących w odległości 10 000 m od emitora. Taką samą zależność wykazano analizując długość igieł pobranych z tej odległości. Podobnie jak we wcześniej opisanych wskaźnikach najmniejsze masy igieł sosnowych uzyskano dla igieł pobranych z sosen rosnących w odległościach 100 i 1500 m od emitora. Rozpatrując wiek igieł można stwierdzić, że zarówno większą masą jak i długością charakteryzowały się igieł jednoroczne.

Analizując wpływ składowania odpadów komunalnych na stan drzewostanów sosnowych stwierdzono, że na wskaźnik FAL istot-



Rys. 4. Średnie długości [mm] i masy [g] igieł zebranych z drzew rosnących w sąsiedztwie PKN Orlen ze słupkami średnich błędów standardowych (SE): BPK, T – obiekty kontrolne (Brudzeński Park Krajobrazowy, Trękus)

Fig. 4. Mean length [mm] and weight [g] of Scots pine needles extracted from trees growing in the neighborhood of PKN Orlen with the standard errors (SE): BKT, T – control objects (Brudzeński Park Krajobrazowy, Trękus)

Tabela 4. Analiza wariancji – składowisko odpadów w Dywitach

Table 4. Analysis of variance – landfill in Dywity

Czynniki	FAL		FAM		Średnia masa igieł		Średnia długość igieł	
	F _{emp}	p	F _{emp}	p	F _{emp}	p	F _{emp}	p
O	77,42**	<0,001	1,01ns	0,3875	56,98**	<0,001	83,42**	<0,001
W	31,92**	<0,001	0,45ns	0,5008	151,42**	<0,001	105,68**	<0,001
OxW	2,50ns	0,0585	0,93ns	0,4224	30,45**	<0,001	5,75**	<0,001

Oznaczenia jak w tabelach 1 i 2.

Tabela 5. Wartości wskaźników FAM i FAL w zależności od odległości od składowiska Dywity

Table 5. The values of FAM and FAL depending on the distance from the Dywity landfill

Czynniki		FAM	FAL
Odległość [m]	1	0,054 c	0,007 a
	5	0,050 c	0,014 a
	10	0,042 b	0,016 a
	15	0,025 a	0,006 a
	5 000 (Kontrola - Brąswałd)	0,012 a	0,015 a
Wiek igieł	Igły jednoroczne	0,040 B	0,014 A
	Igły dwuletnie	0,033 A	0,010 A

Oznaczenia jak w tabeli 3.

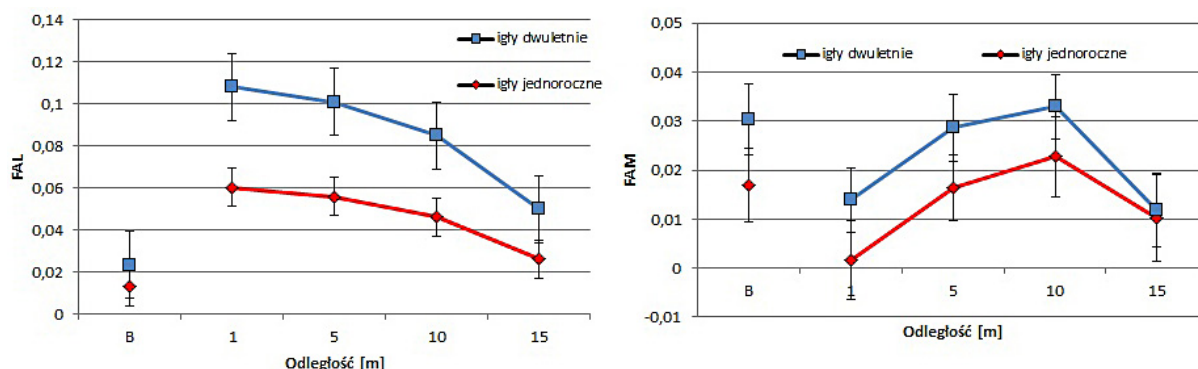
nie wpływała odległość od składowiska. Istotny okazał się też wiek zebranych igieł, natomiast interakcja pomiędzy czynnikami nie była istotna. Średnie masy i średnie długości igieł determinowane były przez wszystkie analizowane czynniki oraz ich interakcje. Na wskaźnik FAM żaden z czynników istotnie nie wpływał (tabela 4).

Wskaźnik asymetrii fluktuacyjnej FAL igieł sosny pobranych w okolicach składowiska kształtował się w granicach od 0,025 do 0,054. Były to wartości wyższe w porównaniu do obiektu kontrolnego, gdzie FAL kształtował się na poziomie 0,012. Najwyższą wartość wskaźnika asymetrii fluktuacyjnej FAL uzyskano dla jednorocznych igieł sosnowych

pobranych z drzew rosnących najbliżej składowiska (odległość 1 i 5 m). Wraz ze zwiększaniem się odległości od składowiska wskaźnik asymetrii fluktuacyjnej zmniejszał się (tab. 5, rys. 5).

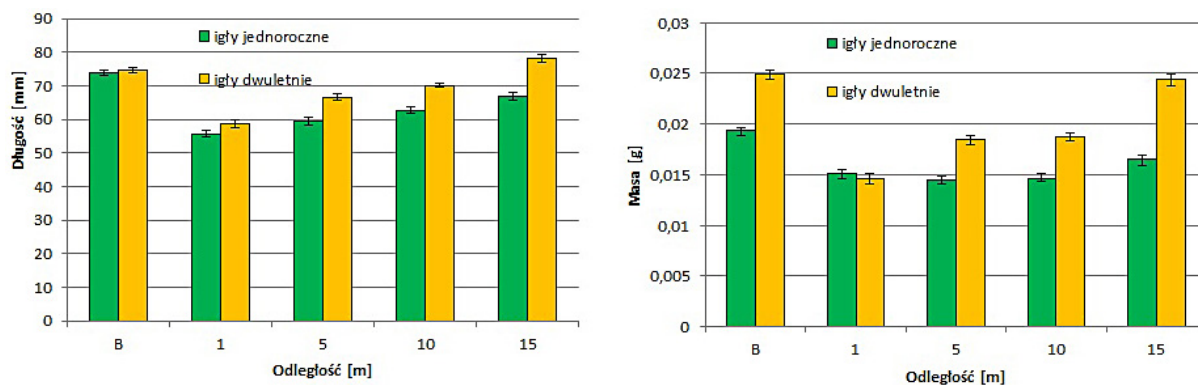
Porównując wartość wskaźnika FAL dla igieł jednorocznych i dwuletnich wyższe wartości uzyskano w przypadku igieł jednorocznych (tab. 6), tak jak w przypadku igieł pobranych z okolic PKN Orlen. Analiza statystyczna nie wykazała istotnych zależności pomiędzy odległością od składowiska a wielkością wskaźnika FAM (rys. 5).

Długość igieł w parze istotnie zależała od odległości od składowiska oraz wieku igieł. Najkrótsze igły pobrano z sosen rosnących w odległości 1 m od składowiska: 55,6 mm i 58,6 mm odpowiednio dla



Rys. 5. Wartości wskaźników FAM i FAL w zależności od odległości od składowiska ze słupkami średnich błędów standardowych (SE): B – obiekt kontrolny (Brąswałd)

Fig. 5. The values of FAM and FAL depending on the distance from the landfill with the standard errors (SE): B – control object (Brąswałd)



Rys. 6. Średnie długości [mm] i masy [g] igieł zebranych z drzew rosnących w sąsiedztwie składowiska Dywity ze słupkami średnich błędów standardowych (SE): B – obiekt kontrolny (Brąswałd)
Fig. 6. Mean length [mm] and weight [g] of Scots pine needles extracted from trees growing in the neighborhood of landfill in Dywity with the standard errors (SE): B – control object (Brąswałd)

igieł jednorocznych i dwuletnich. Najdłuższe igły występowały na sosnach rosnących 15 m od składowiska: 66,8 mm (jednoroczne) i 78,1 mm (dwuletnie). Igły jednoroczne były krótsze od igieł dwuletnich w każdym z analizowanych punktów (rys. 6).

Średnia masa igieł dwuletnich pobranych z drzew rosnących przy składowisku była większa niż igieł jednorocznych. Największą masą odznaczały się igły pobrane z drzew rosnących najdalej od składowiska.

DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

W pracy podjęto próbę oceny wpływu zanieczyszczeń, generowanych przez różne źródła, na stan zdrowotny sosny zwyczajnej. Jako miarę reakcji sosny na zanieczyszczenia antropogeniczne przyjęto wskaźniki asymetrii fluktuacyjnej igieł sosnowych (FAL, FAM). Stres środowiskowy wywołany czynnikami antropogenicznymi (transportem drogowym oraz składowaniem odpadów komunalnych) znacząco wpływał na stan drzewostanu rosnącego najbliżej o czym świadczy wysoka wartość FAL. W przypadku drogi o dużym natężeniu ruchu najwyższy wskaźnik asymetrii fluktuacyjnej FAL zaobserwowano u igieł sosnowych pobranych z drzew rosnących w odległości 50 i 250 m od drogi, w przypadku składowiska odległość ta wynosiła 1 i 5 m. Igły sosnowe pobrane z drzew rosnących dalej od emitorów charakteryzował niższy FAL.

Natężony ruch samochodowy istotnie wpływał na wartość wskaźnika FAM, który malał wraz ze zwiększaniem się odległości od skraju drogi szybkiego ruchu. Wynika z tego, że największe skażenie występowało w pobliżu emitorów za-

nieczyszczeń co potwierdzają też w swoich badaniach Chudzińska et al. [2014], którzy wykazali najwyższe wskaźniki asymetrii igieł dla sosen rosnących w pobliżu huty cynku, tam gdzie zawartość metali ciężkich w glebach była największa. Potwierdzają to Czubaszek and Bartoszek [2011], oraz Szydłowski, Mielczarek and Podlasińska [2017] którzy oceniając zawartość Pb, Cr, Ni, Cd, Cu, Co i Zn. w glebach przydrożnych stwierdzili zmniejszanie się zawartości analizowanych pierwiastków w miarę oddalania się od pasa drogowego, co świadczy o ich wyższej koncentracji najbliżej trasy. Modrzewska and Wyszowski [2014; 2015] analizując zawartość metali ciężkich (Cd, Zn, Pb, Ni, Cr, Cu, Fe) wzdłuż drogi krajowej 51 (północno-wschodnia Polska), wykazali dodatnią wysoką korelację odległości z zawartością poszczególnych mikrośladników. Zawartość Pb, Cd, Cr i Ni w glebach przylegających bezpośrednio do drogi (25 m) była wyższa w porównaniu do zawartości tych pierwiastków w wierzchniej warstwie gleby pobranej z odległości 50 i 100 m. Z kolei Filipek-Mazur and Gondek [2002] podczas badania wpływu drogi krajowej nr 4 na zawartość Zn, Pb i Cd w glebach stwierdzili punktowe wzbogacenie wierzchniej warstwy gleby w wybrane metale. Z badań Kozłova et al. [2002], którzy analizowali wpływ zanieczyszczenia środowiska Ni i Cu wynika podobna zależność, jak w badaniach własnych. Wskaźnik FAL uzyskany dla igliwia pobranego najbliżej emitora był największy i zmniejszał się wraz ze wzrostem odległości od huty. Przydatność wskaźnika FA wykazali też Makarenko et al. [2016] badając zdrowotność sosen rosnących w rejonie Czarnobyli, wskazali oni zróżnicowane wartości wskaźnika FA sosen, które narażone były na przewle-

kłe promieniowanie. W swoich badaniach także zaś Chudzińska et al. [2014] podkreślają wysoką wartość FA drzewostanów występujących tuż przy torach kolejowych, a więc tam gdzie intensyfikacja skażeń była największa.

Nieprawidłowo zlokalizowane i eksploatowane składowiska odpadów komunalnych negatywnie oddziałują na środowisko. Głównym źródłem zanieczyszczenia gleb i wód w otoczeniu składowiska są odcieki przenikające przez nie uszczelnione dno [Wiater 2011]. Składowisko w Dywitach zbudowane w wyrobisku pogórnym nie posiada odpowiednich uszczelnień podstawy jest więc potencjalnym źródłem zanieczyszczeń. Wskaźnik FAL igieł sosnowych pobranych z drzew rosnących w okolicach składowiska odpadów w Dywitach zmniejszył się wraz ze zwiększeniem odległości od składowiska co może świadczyć o dużej koncentracji zanieczyszczeń na obszarze przylegającym do składowiska. Potwierdza to Wiater [2011], która badała wpływ składowiska odpadów w Czerwonym Borze na jakość wód i gleb. Koncentracja Zn, Mn i Pb w glebach pobranych w punkcie zlokalizowanym w odległości 5 m od składowiska w Czerwonym Borze była wyższa niż w glebach pobranych 100 m za składowiskiem.

Odstępstwo od wyników przedstawionych powyżej, w badaniach własnych, zaobserwowano w przypadku sosen rosnących w okolicach PKN Orlen. Największe wskaźniki FAL i FAM zanotowano nie dla igieł sosny pobranych z drzew rosnących najbliżej zakładu, ale dla drzewostanów położonych w odległości 10 i 15 km na wschód od PKN Orlen. Prawdopodobnie związane to jest z emisją zanieczyszczeń ze źródeł przemysłowych i niezorganizowanych Płocka, a następnie ich transportem i opadaniem w większych odległościach co znajduje potwierdzenie w wynikach modelowania dyspersji zanieczyszczeń powietrza publikowanych w corocznych raportach dotyczących jakości powietrza w województwie mazowieckim [WIOŚ 2009-2015]. Zanieczyszczenia powietrza negatywnie oddziałują na poszczególne komponenty środowiska. Niekorzystny wpływ zanieczyszczeń gazowych na drzewostan sosnowy objawia się w postaci zmian w aparacie asymilacyjnym [Barniak and Krąpiec 2009; Kostrz and Satora 2017].

W każdym z analizowanych drzewostanów w porównaniu do wybranych obiektów kontrolnych zanotowano istotne różnice w długości i masie igieł pobranych z drzew rosnących na terenach objętych antropopresją. Najkrótsze igły miały sosny narażone na oddziaływanie związane

ze składowaniem odpadów komunalnych oraz funkcjonowaniem zakładu petrochemicznego. W przypadku sosen rosnących w okolicach drogi szybkiego ruchu najdłuższe igły zaobserwowano u sosen rosnących najbliżej trasy (odległość 50 m), co potwierdza się badaniach Czerniaka et al. [2009], którzy najdłuższe sosnowe igły pobrali z drzew rosnących w obrębie transektu oddalonego o 60 m od drogi szybkiego ruchu.

WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować, że wskaźnik FA jest czułym bioindykatorem środowiska co potwierdzają też Kozlov et al. [2002], Chudzińska et al. [2014], Makarenko et al. [2016]. Jednakże, na co zwracają uwagę Chudzińska and Urbaniak [2008] jest on zależny od różnych parametrów, dlatego też nie może być stosowany jako jedyny wskaźnik stresu środowiskowego. W pracy wykazano, że wskaźnik FA igieł sosny może być brany pod uwagę jako wskaźnik stresu oceniający wpływ antropopresji na drzewostany sosnowe. Powinien być jednak uzupełniony dodatkowymi analizami takimi jak zawartość metali ciężkich w igłach czy fluorescencja chlorofilu.

LITERATURA

1. Bajorek-Zydroń K., Krzaklewski W., Pietrzykowski M. 2007. Ocena zaopatrzenia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w składniki pokarmowe w warunkach zwałowiska zewnętrznego KWB „Bełchatów”. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 31(2), 67-74.
2. Barniak J., Krąpiec M. 2009. Wpływ działalności przemysłowej na drzewostany sosnowe w rejonie Tarnobrzega w świetle analizy dendrochronologicznej. *Sylwan* 153(12), 825-835.
3. Błocka A., Staszewski T. 2007. Asymetria fluktuacyjna igliwia - niespecyficzny wskaźnik stresu sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Leśne Prace Badawcze* 4, 125-131.
4. Czubaszek R., Bartoszek K., 2011. Zawartość wybranych metali ciężkich w glebach w zależności od ich odległości od ulicy i sposobu użytkowania terenu. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2, 27-34.
5. Chudzińska E., Urbaniak L. 2008. Reakcja sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na zanieczyszczenia metalami ciężkimi w cechach anatomii igieł. W: Kannenberg K i Szramka H (red.) *Zarządzanie Ochroną Przyrody w Lasach Tom II. Wyższa Szkoła Zarządzania Środowiskiem, Tuchola*, 72-83.

6. Chudzińska E., Pawlaczyk E.M., Celiński K., Diatta J.T. 2014. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to stress induced by different types of pollutants – testing the fluctuating asymmetry. *Water Environ. J.* 28: 533–53. doi:10.1111/wej.12068.
7. Czerniak A., Górna M., Kayzer D. 2009. Wpływ drogi o dużym natężeniu ruchu na cechy fizyczne igieł sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 5, 19-26.
8. Dynowska M., Ciecierska H. (red.) 2013. Biologiczne metody oceny stanu środowiska. Wyd. UWM w Olsztynie. ISBN 978-83-62860-20-3.
9. Fair J.M., Breshears D.D., 2005. Drought stress and fluctuating asymmetry in *Quercus undulata* leaves: confounding effects of absolute and relative amounts of stress? *J. Arid Environ.* 62, 235–249. doi:10.1016/j.jaridenv.2004.11.010.
10. Filipek-Mazur B., Gondek K. 2002. Poziom wybranych metali ciężkich w glebach i runi łąkowej w granicach oddziaływania drogi krajowej nr 4 na terenie powiatu dębickiego. *Acta Sci. Pol., Form. Cir.* 1.1: 131–141.
11. GDKDIA 2010. Generalny Pomiar Ruchu w 2010 roku. On line: <http://www.gddkia.gov.pl/user-files/articles/g/GENERALNY-POMIAR-RUCHU-2010/0.1.1.4-SDR-w-pkt-pomiarowych-w-2010-roku.pdf>.
12. Graham J.H., Dudab J.J., Brown M.L., Kitchend S., Emlenb J.M., Malole J., Bankstahlc E., Krzysike A.J., Balbachf H., Freemanc D.C., 2012. The effects of drought and disturbance on the growth and developmental instability of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Ecol. Indic.* 20, 143–150. doi:10.1016/j.ecolind.2012.03.007.
13. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E., 2010. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. *Symmetry* 2, 466–540. doi:10.3390/sym2020466.
14. Hardersen S. 2000. The role of behavioural ecology of damselflies in the use of fluctuating asymmetry as a bioindicator of water pollution. *Ecol. Entomol.* 25, 45-53.
15. Jaworska H., Dąbkowska-Naskręt H., Sawilska K. 2010. Wpływ pyłów cementowych na niektóre właściwości gleb oraz stan drzewostanów sosnowych w otoczeniu zakładów cementowo-wapienniczych „LAFARGE” w Bielawach. *Proceedings of ECOpole*, 4(1), 141-146.
16. Kluz J., Sznajder B. 1998. Czy symetria ma znaczenie w przyrodzie? *Pismo Polskiego Towarzystwa Przyrodników im. Kopernika*, 11(2419), 221-223.
17. Kostrz M., Satora P. 2017. Związki odpowiedzialne za zanieczyszczenie powietrza. *Inżynieria Ekologiczna*, 18(6), 89–95.
18. Kozlov M., Niemelä P. 1999. Difference in needles length - a new a objective indicator pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Water, Air Soil Poll.* 116, 365-370.
19. Kozlov M., Niemelä P., Mälikönen E. 2002. Effects of compensatory fertilization on pollution-induced stress in Scots pine. *Water, Air Soil Poll.* 134, 307-318.
20. Kozlov M.V., Zvereva E., Zverev V., 2009. Impacts of point pollutants on terrestrial biota. *Environ. Pollut.*, Vol. 15, ss. 466.
21. Otronen M., Rosenlund H.-M., 2001. Morphological asymmetry and chlorophyll fluorescence in Scots pine (*Pinus sylvestris*): response to variation in soil moisture nutrients and defoliation. *Ann. Bot. Fenn.* 38, 285-294.
22. Makarenko E.S., Oudalova A.A., Geras'kin S.A., 2016. Study of needle morphometric indices in Scots pine in the remote period after the Chernobyl accident. *Radioprotection* 51(1), 19-23. DOI: 10.1051/radiopro/2015026.
23. Modrzewska B., Wyszowski M., 2014. Trace metals content in soils along the state road 51 (northeastern Poland). *Environ. Monit. Assess.* 186, 2589–2597.
24. Modrzewska B., Wyszowski M., 2015. Content of selected trace elements in soils along state road 51 (North-Eastern Poland). *Pol. J. Nat. Sc.*, 30(2), 103–112.
25. Parzych A., Sobisz Z., 2012. Zawartość makro- i mikropierwiastków w szpilkach *Pinus sylvestris* L. i *Pinus nigra* J.F. Arn. w zespole *Cladonio-Pinetum* Słowińskiego Parku Narodowego. *Leśne Prace Badawcze* 73(4), 295-303. DOI: 10.2478/v10111-012-0028-y.
26. Pérez-Contreras T., Soler J.J., Soler M., 2008. Needle asymmetry, pine vigour and pine selection by the processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*. *Acta Oecol.* 33(2), 213-221.
27. Szydłowski K., Mielczarek M., Podlasińska J. 2017. Zanieczyszczenie wybranymi metalami ciężkimi gleb przyległych do obwodnic Stargardu (S10) oraz Nowogardu (S6). *Inżynieria Ekologiczna*, 18(3), 253–260.
28. Świercz A., Smorzewska E., Bogdanowicz M., 2014. State of scots pine needles' epicuticular waxes and content of microelements in bioindication. *Ecol. Chem. Eng. A.* 21(3), 367-375. doi: 10.2428/ecea.2014.21(3)30.
29. Wiater J. 2011. Wpływ składowisk odpadów komunalnych na jakość wód podziemnych i właściwości gleb. *Inżynieria Ekologiczna* Nr 26, 133-146.
30. WIOŚ, 2009-2015. Roczna ocena jakości powietrza w województwie mazowieckim. Raporty. Wyd. WIOŚ Warszawa.
31. Zimny H. 2006. Ekologiczna ocena stanu środowiska – Bioindykacja i biomonitoring. Agencja Reklamowo-Wydawnicza Arkadiusz Grzegorzczak, Warszawa.