

MARTA MARCJANEK¹
PATRYCJA SŁODOWNIK²
KRASSIMIRA ILIEVA-MAKULEC³

Owady (mrówki, chrząszcze, motyle) jako biowskaźniki

Słowa kluczowe: bioindykacja, biowskaźniki, mrówki, chrząszcze, motyle
Key words: bioindication, bioindicators, ants, beetles, butterflies

SUMMARY

Insects (ants, beetles, butterflies) as bioindicators

This paper is about bioindication, which is a method of assessing environmental conditions by using the response of organisms to changes in the environment. On the basis of available literature, some examples using selected groups of insects (ants, beetles and butterflies) as bioindicators are discussed.

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat obserwujemy szybko postępującą degradację środowiska naturalnego. Zjawisko to, mające już

¹ Adres: Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Instytut Ekologii i Bioetyki, ul. Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa. Adres e-mail: marta.0309@autograf.pl.

² Adres: Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Instytut Ekologii i Bioetyki, ul. Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa. Adres e-mail: dinara1@op.pl.

³ Adres: Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Instytut Ekologii i Bioetyki, ul. Wóycickiego 1/3, b. 23 p. 304, 01-938 Warszawa. Adres e-mail: k.makulec@uksw.edu.pl.

obecnie charakter globalny, jest spowodowane przede wszystkim działalnością człowieka, związaną głównie z rozwojem przemysłu i rolnictwa.

Bioindykacja jest znaną od wielu lat (druga połowa XIX wieku), mającą coraz szersze zastosowanie, metodą oceny stanu środowiska. Polega ona na wykorzystaniu różnych charakterystyk wskaźnikowych gatunków zwierząt i roślin i ich układów (populacji, zespołów itp.) do oceny stanu zarówno biotycznych jak i abiotycznych parametrów środowiska. Szerokie spektrum zastosowań tej metody wynika z faktu, że właściwie każdy żywy organizm może zareagować w sposób zauważalny na zmiany w środowisku naturalnym, które nie mieszczą się w jego zakresie tolerancji. Dotyczy to zarówno takich zmian jak zwiększające się zanieczyszczenia wód, gleby czy powietrza, jak i zmian siedliskowych (np. warunków cieplno-wilgotnościowych) lub przekształceń szaty roślinnej.

Wyjaśnienia możliwości wykorzystania żywych organizmów jako wskaźników cech i stanu środowiska należy szukać w dwóch podstawowych prawach ekologicznych: prawie minimum Liebiga i prawie tolerancji Shelforda. Zgodnie z prawem minimum Liebiga, wzrost i rozwój organizmów ogranicza czynnik, którego jest najmniej. Natomiast prawo tolerancji Shelforda uzupełniając prawo Liebiga głosi, że rozwój organizmu ograniczony jest nie tylko przez niedobór, lecz również przez nadmiar dowolnego czynnika. Organizmy żywe ograniczane są nie tylko przez czynniki abiotyczne, ale także w wyniku interakcji międzygatunkowych w których biorą udział.

Przewaga metody bioindykacji nad metodami fizykochemicznymi polega na tym, że wartościuje ona nie tylko oddziaływanie czynników abiotycznych na organizm, ale również struktury i procesy z punktu widzenia interakcji zachodzących pomiędzy organizmami żywymi. Bioindykacja najczęściej wykorzystywana jest do oceny: różnorodności biologicznej, integralności ekosystemu, skażenia metalami ciężkimi czy zmian sposobu użytkowania ziemi (Roo-Zielińska et al. 2000).

Podstawą bioindykacji jest obserwacja organizmów żywych, a poprawna interpretacja wyników obserwacji umożliwia rejestrację, ana-

lizę i prognozę zmian zachodzących w środowisku (Roo-Zielińska et al. 2000). Ważne jest umiejętne odróżnianie efektów zmian będących wynikiem presji antropogenicznej od efektów, których podstawą jest naturalna zmienność środowiska. Zarówno za sprawą oddziaływania człowieka jak i naturalnej sukcesji, środowisko podlega ciągłym zmianom, tworzy się nowy układ, co w efekcie wywołuje różnorodne reakcje poszczególnych gatunków roślin i zwierząt, które ten układ zasiedlają (Skibińska, Chudzicka 2000).

Organizmy żywe wykorzystywane w bioindykacji nazywane są organizmami wskaźnikowymi lub bioindykatorami. Aby dany gatunek mógł być określony mianem dobrego biowskaźnika musi posiadać szereg cech. Przede wszystkim organizm ten powinien charakteryzować się wąskim i/lub specyficznym oraz dobrze poznanym zakresem tolerancji na dany czynnik, a jego reakcja cechować się powtarzalnością. Do cech dobrego biowskaźnika należą również: duży zasięg geograficzny gatunku, duża liczebność występowania, łatwość łowienia ilościowego i identyfikacji gatunkowej, niewielka zmienność genetyczna i ekologiczna, a także dobrze poznana biologia i fizjologia oraz długi cykl życiowy.

Zmiany w układach biologicznych i ekologicznych wywołane zmiennością środowiska zauważyć można na wszystkich poziomach ich organizacji:

- biogeograficznym (np. zmiany zasięgów gatunków),
- biocenotycznym (np. zmiany liczebności, bogactwa gatunkowego oraz różnorodności w zespołach),
- populacyjnym (np. obecność gatunków i ich liczebności)
- osobniczym (np. zmiany anatomiczne, fenologiczne)
- tkankowym i organowym (np. zmiany morfologiczne)
- komórkowym (np. melanizm)
- subkomórkowym (np. zmiany w DNA, RNA) (Roo-Zielińska et al. 2000).

Cechy dobrego bioindykatora posiadają gatunki pochodzące z wielu grup systematycznych zwierząt. Wśród owadów coraz szersze zastoso-

wanie w badaniach bioindykacyjnych i biomonitoringu mają przedstawiciele trzech grup: chrząszczy *Coleoptera*, mrówek *Formicidae* i motyli *Lepidoptera*.

Owady z tych grup wykorzystuje się nie tylko do oceny stanu środowisk leśnych i rolniczych, lecz także do oceny stopnia degradacji terenów narażonych na działanie silnej presji antropogenicznej, głównie urbanizacyjnej. Owady wykorzystywane są w bioindykacji ze względu na ogromne bogactwo gatunków, różnorodność związków i zależności łączących je z innymi organizmami oraz obecność we wszystkich typach środowisk lądowych. Owady są najbardziej liczną grupą zwierząt w wielu ekosystemach, są zróżnicowane pod względem rozmiarów i kształtów, występują w różnych miejscach sieci troficznych. Ich zdolność do lotu umożliwia kolonizację nowych środowisk. Ponadto w cyklu życiowym owadów występują z jednej strony słabo ruchliwe formy larwalne, a z drugiej strony bardziej ruchliwe formy dorosłe, które różnią się wrażliwością na zmiany w środowisku. Na terenach silnie zanieczyszczonych zaobserwować można zmiany w liczebności określonych gatunków, zmiany w strukturze dominacyjnej poszczególnych gatunków, a także zmiany morfologiczne (Skibińska, Chudzicka 2000).

2. Mrówki jako biowskaźniki

Mrówki mogą być wykorzystywane w bioindykacji na wielu płaszczyznach, najczęściej jednak stosowane są jako indykatory stanu, jakości i zmienności siedlisk będących pod wpływem prowadzenia intensywnej gospodarki rolnej. Gromadząc w swoich tkankach toksyczne substancje mogą służyć również jako „monitory” np. w badaniach nad obecnością metali ciężkich w glebie.

Metody bioindykacji z wykorzystaniem mrówek stosowane mogą być również w celu określenia kierunku, tempa i intensywności zmian siedliska, zachodzących w toku naturalnej sukcesji. W badaniach prowadzonych na terenie Nadleśnictwa Niedźwiady (RDLP Szczecinek) w latach 2000-2002, stwierdzono wyraźne różnice w składzie gatun-

kowym mrówek na porzuconych gruntach rolnych, będących w różnych fazach sukcesji (Mazur 2004). Wyznaczono osiem stanowisk badawczych (Tabela 1). W trakcie badań stwierdzono znaczące różnice w występowaniu różnych gatunków mrówek na poszczególnych stanowiskach. Na przykład gatunek *Lasius niger* występował najliczniej na stanowiskach będących w bardzo wczesnej fazie sukcesji (1, 2 i 3), natomiast na stanowiskach prezentujących zaawansowany stopień sukcesji (7 i 8) nie stwierdzono żadnego osobnika należącego do tego gatunku. Odwrotną sytuację zaobserwowano w przypadku innego gatunku mrówki *Myrmica rubra*. Na stanowiskach 1, 2, 3 nie stwierdzono obecności tego gatunku lub pojawiały się pojedyncze osobniki, natomiast licznie występował na stanowiskach wcześniej odłogowanych np. stanowiska 6 i 8.

Tabela 1. Liczebności mrówek z gatunków *Lasius niger* i *Myrmica rubra* na stanowiskach o różnym stopniu zaawansowania sukcesji*.

	Typ siedliska	<i>Lasius niger</i>	<i>Myrmica rubra</i>
1	1-2 letni ugór	336	2
2	2-5 letni ugór z elementami muraw	338	1
3	15-letni ugór, wkraczająca sosna	1228	0
4	20-30 letni ugór (12-letnie młodniki sosnowe)	226	23
5	Stary ugór, 40-letnie drągowiny	8	413
6	Drzewostan dojrzewający 70-letni na ugorze	15	615
7	Drzewostan 115-letni na ugorze	1	103
8	Drzewostan 100-letni na gruncie leśnym	0	781

*na podstawie wyników badań: Mazur (2004)

Autor badań tłumaczy obserwowane różnice w występowaniu tych dwóch gatunków mrówek różnicami w ich wymaganiach w stosunku do warunków cieplno-wilgotnościowych oraz szaty roślinnej. Młode ugory, pokryte niewielką ilością roślinności, charakteryzujące się silnym nasłonecznieniem, a co za tym idzie przesuszeniem wierzchniej warstwy gleby, zasiedlane są przez mrówki z gatunku *Lasius niger*, który znosi skrajne warunki środowiskowe. Natomiast stanowiska w zaawansowanej fazie sukcesji, o większym stopniu pokrycia szaty roślinnej

i wilgotniejszym mikroklimacie są bardziej odpowiednie dla *Myrmica rubra* (Mazur 2004).

Podobne badania przeprowadzone zostały w Viscoza w Brazylii (Schmidt et al. 2013). Do lat sześćdziesiątych XX wieku na tych obszarach bardzo prężnie rozwijało się rolnictwo oraz pasterstwo. Intensywne wykorzystanie terenu doprowadziło do tego, że obecnie region ten składa się z wielu wyeksploatowanych, a następnie porzuconych obszarów charakteryzujących się odmiennymi stadiami sukcesji roślinnej. W trakcie badań (przeprowadzonych w 2007 roku) porównano bogactwo gatunkowe oraz skład gatunkowy mrówek odłowionych na ośmiu stanowiskach o różnych stopniach zaawansowania sukcesji. Stwierdzono brak zależności pomiędzy czasem regeneracji siedlisk, a bogactwem (liczbą) gatunków mrówek występujących na danym obszarze. Natomiast skład gatunkowy mrówek wyraźnie zmieniał się wraz z postępującą sukcesją. Obserwacje wykazały, że gatunek *Camponotus novograndensis* jest gatunkiem pionierskim. Może być wykorzystywany jako biowskaźnik odnowionych siedlisk leśnych. Inne mrówki *Camponotus melanoticus* i *Atta sexdens rubropilosa* to gatunki pojawiające się na otwartych przestrzeniach głównie w początkowych etapach sukcesji. Natomiast gatunki *Rogeria micromma*, *Camponotus rufipes* i *Pachycondyla striata* występowały na obszarach charakteryzujących się różnym stopniem zaawansowania naturalnej sukcesji. Świadczy to o dużej tolerancji tych gatunków w odniesieniu do warunków siedliskowych, a zatem o mniejszej ich przydatności jako bioindykatorów stopnia zaawansowania sukcesji (Schmidt et al. 2013).

Mrówki mogą służyć nie tylko jako wskaźniki zmian warunków siedliskowych. Wykorzystywane są one również jako „monitory” np. w badaniach obecności metali ciężkich w glebie, ponieważ wykazują zdolność do gromadzenia w tkankach toksycznych substancji w tym metali ciężkich np. arsenu.

Badania dotyczące wpływu arsenu na organizmy mrówek przeprowadzone zostały w Brazylii, na obszarze, który należał niegdyś do fabryki AngloGold Ashanti South America produkującej na dużą skalę

arszenik (trinitlenek diarsenu), służący zwalczaniu szczurów. Obserwacje wykazały, że ten związek chemiczny ma dwojaki wpływ na populację mrówek bytujących na terenach skażonych. O bezpośrednim działaniu arsenu na organizmy mrówek świadczy poziom zakumulowanego pierwiastka w ich organach. Ilość arsenu zgromadzona w szczękach okazała się dużo wyższa niż w pozostałych częściach ciała (Ribas et al. 2012). Wpływ pośredni przejawiał się spadkiem liczebności mrówek nadrzewnych, jako konsekwencja negatywnego oddziaływania arsenu na wzrost roślinności drzewiastej. Jednocześnie na skażonych terenach zaobserwowano wzrost fauny mrówek epigeicznych.

3. Chrząszcze jako biowskaźniki

Owady należące do rzędu chrząszczy wykorzystywane są jako wskaźniki zmian warunków siedliskowych, przede wszystkim spowodowanych obecnością i działalnością człowieka. Są one również stosowane przy ocenie obecności niektórych pierwiastków w glebie m. in. azotu, siarki.

W badaniach bioindykacyjnych najczęściej wykorzystuje się chrząszcze saproksyliczne (w Polsce do tej grupy należy ok. 70 rodzin z rzędu *Coleoptera*, wśród nich przedstawiciele biegaczowatych (*Carabidae*), a także sprężykowatych (*Elateridae*).

Chrząszcze saproksyliczne są grupą owadów całkowicie zależną od obecności martwego drewna, będącego dla nich miejscem bytowania, żerowania i schronienia przed drapieżcami czy niekorzystnymi warunkami pogodowymi. Stanowią istotny element różnorodności biologicznej i niezastąpiony czynnik równowagi ekologicznej, biorąc udział w wielu procesach zachodzących w ekosystemie. Poszczególne gatunki różnią się wymaganiami pokarmowymi (rodzaj drewna i stopień jego rozkładu), oraz zakresem tolerancji wobec warunków abiotycznych takich jak światło i wilgotność. Z powodu opisanego zróżnicowania gatunków parametry owady z tej grupy mogą z powodzeniem być wykorzystywane w badaniach bioindykacyjnych. Wyniki badań prowadzonych w latach 1997-2005 wykazały zależność między obecnością

martwego drewna, a udziałem chrząszczy saproksylicznych pośród wszystkich chrząszczy na danym obszarze (Gutowski et al. 2006). Obserwacje przeprowadzono na pięciu obszarach badawczych (1 – Puszcza Białowieska, 2 – Biebrzański PN, 3 – Bory Tucholskie, 4 – Puszcza Kozienicka, 5 – Nadleśnictwo Świerklaniec na Śląsku), które wykazywały różne poziomy przekształcenia środowiska pod wpływem presji antropogenicznej, od lasu naturalnego jakim jest Puszcza Białowieska, do lasu gospodarczego zajmującego najsilniej zanieczyszczony przez przemysł obszar Nadleśnictwa Świerklaniec. Wyniki badań wskazały jednoznacznie, że spadek udziału chrząszczy saproksylicznych jest wprost proporcjonalny do zwiększenia zmian antropogenicznych na danym obszarze, natomiast występowanie dużej liczby gatunków chrząszczy świadczy o zachowaniu ciągłości lasów naturalnych. Wyniki obserwacji przedstawiono w Tabeli 2 (Gutowski et al. 2006)

Tabela 2. Liczba gatunków chrząszczy saproksylicznych na terenach o różnym stopniu przekształcenia środowiska pod wpływem presji antropogenicznej*.

	Obszar badań	Liczba gatunków saproksylicznych
1	Puszcza Białowieska	293
2	Biebrzański PN	270
3	Bory Tucholskie	191
4	Puszcza Kozienicka	184
5	Nadleśnictwo Świerklaniec na Śląsku	162

*na podstawie wyników badań: Gutowski et al. (2006)

Podobne wyniki uzyskano, gdy analizowano zgrupowania chrząszczy saproksylicznych na 36 powierzchniach badawczych, reprezentujących różni poziom antropopresji w Puszczy Białowieskiej (Byk, Mokrzycki 2007). Autorzy stwierdzili, iż w porównaniu do lasów Białowieskiego Parku Narodowego, drzewostany pozrębowe, o składzie niezgodnym z siedliskiem lub rosnące w sąsiedztwie gruntów ornym bądź szkółek leśnych są zasiedlane przez mniej liczne w osobniki i gatunki zgrupowania chrząszczy saproksylicznych.

Chrząszcze wykorzystywane mogą być również w ocenie zanieczyszczenia chemicznego gleb. Wpływ podwyższonej zawartości związków azotu i siarki na chrząszcze z rodziny biegaczowatych (*Carabidae*) zauważono już w latach siedemdziesiątych XX wieku, badając wpływ, emitowanych z Zakładów Azotowych w Puławach, zanieczyszczeń na stan przyległych lasów (Puszkarski 1997). Analizując wyniki obserwacji prowadzonych w trzech strefach o różnym stopniu zanieczyszczenia, stwierdzono dużą wrażliwość chrząszczy z rodziny *Carabidae* na związki siarki i azotu. Świadczy o tym całkowity zanik populacji chrząszczy na terenach silnie zanieczyszczonych związkami azotu i siarki i brak takiej reakcji na terenach nie będących pod wpływem tych związków, co przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Wpływ związków azotu i siarki na chrząszcze z rodziny biegaczowatych*.

Strefa	Stopień zanieczyszczenia związkami azotu i siarki	Zmiany w zgrupowaniach chrząszczy
1	niski	Niewielkie zmiany w stosunku ilościowym gatunków
2	średni	Dominacja między gatunkami zaczęła ulegać zmianie
3	duży	Populacja chrząszczy uległa zanikowi

*na podstawie opracowania wyników badań: Puszkarski (1997)

Podobne wyniki uzyskano w badaniach prowadzonych w Sudetach (Rybak 2008). Na podwyższoną zawartość związków siarki w siedlisku chrząszcze reagowały zarówno fluktuacjami liczebności, jak i zmianą w składzie gatunkowym. Największą wrażliwość na zanieczyszczenie siarką wykazał *Carabus irregularis*. Natomiast u chrząszczy z rodziny kusakowatych (*Staphylinidae*) takiej wrażliwości nie stwierdzono (Rybak 2008).

Chrząszcze z rodziny biegaczowatych wykazują również wrażliwość na związki ropopochodne obecne w środowisku. W badaniach prowadzonych w latach 2002-2003 stwierdzono, iż zanieczyszczenie gleby

benzyną spowodowało dwukrotny spadek liczby osobników, a zanieczyszczenie podłoża olejem napędowym aż sześciokrotne zmniejszenie liczebności (Jaworska, Gospodarek 2004).

Występowanie niektórych gatunków chrząszczy (głównie z rodziny pustoszwotnych *Ptinidae* i kapturkowatych *Bostrichidae*) w drzewostanach świadczy o ich stosunkowo niewielkim przekształceniu przez człowieka. Są one uznawane jako wskaźniki lasów naturalnych (Borowski 2007)

Właściwości wskaźnikowe chrząszczy można wykorzystać również w badaniach dotyczących stanu środowisk leśnych, na przykład do oceny stopnia wilgotności terenu. Jest to możliwe ponieważ chrząszcze, wyraźnie reagują na zmiany parametrów wilgotnościowych siedliska, w którym występują. Badania tego typu prowadzono w latach 2007-2009 w Kampinoskim Parku Narodowym w ramach programu „Monitoring fauny epigeicznej” (Skłodowski 2010). Na badanym terenie wyznaczono 18 stanowisk reprezentujących siedliska o różnych warunkach wilgotnościowych. Analiza zebranego materiału polegała na identyfikacji gatunkowej chrząszczy oraz zaklasyfikowaniu występujących gatunków do jednej z trzech grup: chrząszczy higrofilnych, mezofilnych i kserofilnych. Uzyskane wyniki wykazały wyraźną zależność pomiędzy występowaniem gatunków chrząszczy a stopniem wilgotności terenu (Skłodowski 2010) (Tabela 4).

Z danych zamieszczonych w Tabeli 4 jednoznacznie wynika, że procentowy udział gatunków higrofilnych i kserofilnych odzwierciedla stopień wilgotności środowiska. Szczególnie wysoki udział chrząszczy higrofilnych stwierdzono na stanowiskach: 2 – teren zadarniony, podmokły z przewagą wierzby, 3 – teren podmokły. Za tereny suche uznano stanowiska: 1 – drągowina sosnowa na wydmie, 4 – 31-letni drzewostan dębowy. Ponadto wśród zidentyfikowanych chrząszczy na podstawie częstości ich występowania autor wytypował dwa gatunki, które są wskaźnikami skrajnych warunków wilgotnościowych siedliska. Gatunek *Pterostichus antracinus* okazał się dobrym wskaźnikiem siedlisk o dużym stopniu wilgotności natomiast gatunek *Carabus arcensis* indykatorem siedlisk suchych (Skłodowski 2010).

Tabela 4. Określenie stopnia wilgotności środowiska na podstawie obecności chrząszczy higrofilnych, mezofilnych i kserofilnych*

(k) – gatunek kserofilny; (h) – gatunek higrofilny; (m) – gatunek mezofilny

	Stanowisko	Dominujące gatunki	Udział gatunków higrofilnych	Udział gatunków kserofilnych	Wilgotność
1	Drągowina sosnowa na wydmie	<i>Carabus arcensis</i> (k) <i>Pterostichus niger</i> (h-m)	14%	73%	suche
2	Teren zadarniony, podmokły (wierzba)	<i>Pterostichus anthracinus</i> (h) <i>Oodes helopioides</i> (h)	100%	-	bardzo duża wilgotność
3	Teren podmokły, łąka, luźne kępy drzew	<i>P. anthracinus</i> (h) <i>Agonum obscurus</i> (h)	100%	-	bardzo duża wilgotność
4	31-letni drzewostan dębowy	<i>C. arcensis</i> (k) <i>P. niger</i> (h-m)	15%	66,9%	suche

*na podstawie wyników badań prowadzonych w Kampinoskim Parku Narodowym w latach 2007-2009 (Skłodowski 2010).

Wyniki badań w Kampinoskim Parku Narodowym świadczą o tym, że poza oceną stosunków wilgotnościowych siedliska, chrząszcze wykorzystać można również jako wskaźniki oceny przebiegu naturalnej sukcesji. W tym celu obliczono udział procentowy gatunków leśnych i dużych zoofagów w zgrupowaniach chrząszczy na badanych obszarach. W tabeli poniżej przedstawiono zestawienie wybranych wyników z roku 2009 (Tabela 5). W interpretacji wyników i w formułowaniu wniosków wzięto pod uwagę również wyniki uzyskane w latach poprzednich 2007-2008 (Skłodowski 2010).

Tabela 5. Ocena tempa przebiegu naturalnej sukcesji na podstawie porównania ilościowego udziału gatunków leśnych i dużych zoofagów w zgrupowaniach chrząszczy w 2009 roku do lat 2007 i 2008*.

	Stanowisko	Udział gatunków leśnych	Udział dużych zoofagów	Ocena postępu sukcesyjnego
1	Drągowina sosnowa na wydmie	91,6% (2008 - 75,7%)	94,4% (2008 - 63%)	sukcesja postępująca
2	Teren zadarniony, podmokły (wierzba)	38,6% (2008 - 47,7%, 2007 - 19,5%)	25,7% (2008 - 23,9%, 2007 - 15,9%)	niski rozwój sukcesyjny
3	Teren podmokły, łąka, luźne kępy drzew	49,3% (2008 - 48,8%, 2007 - 35,6%)	9,3% (2008 - 13,9%, 2007 - 11,1%)	niski rozwój sukcesyjny
4	31-letni drzewostan dębowy	97,8% (2008 - 92,7%, 2007 - 66,4%)	97,8% (2008 - 73,7%, 2007 - 35,1%)	sukcesja bardzo szybko postępująca
5	Łąka	1,4% (2008 - 3,7%)	0,7%	stadium pionierskie sukcesji

*na podstawie wyników badań prowadzonych w Kampinoskim Parku Narodowym w latach 2007-2009 (Skłodowski 2010). Dane za lat 2007 i 2008 podano w nawiasach.

Autor stwierdził zależność pomiędzy tempem wzrostu udziału chrząszczy z badanych grup a tempem przebiegu sukcesji. Znaczny wzrost udziału procentowego chrząszczy gatunków leśnych i dużych zoofagów w kolejnych latach świadczył o bardzo szybko postępującej sukcesji. Taka sytuacja miała miejsce na stanowisku 4 i w mniejszym stopniu na stanowisku 1. Jeśli wzrost udziału wymienionych grup był niewielki oznaczało to powolny przebieg sukcesji, natomiast brak wzrostu świadczył o bardzo niewielkim tempie zmian. W sytuacji, zauważalnego spadku ilościowego udziału fauny leśnej i dużych zoofagów wnioskować możemy o występowaniu czynników hamujących przebieg naturalnej sukcesji (stanowisko 3). W przypadku stanowiska 3 czynnikiem tym prawdopodobnie była wysoka wilgotność terenu (Tabela 4). Również w przypadku siedliska będącego w bardzo wczesnej fazie sukcesji liczebność osobników gatunków leśnych i dużych zoofagów była niewielka (stanowisko 5) (Skłodowski 2010).

Jak wykazały wyniki omawianych badań presja negatywnych czynników środowiska powodowała wypieranie dużych zoofagów przez małe zoofagi, a ostatecznie przez hemizoofagi. Większy udział gatunków leśnych natomiast świadczy o leśnym charakterze obszaru badań (Skłodowski 2010).

Zależność pomiędzy wielkością zoofagów a zmiennością środowiska wykazano również w badaniach przeprowadzonych w okolicach Olsztyna (Nietupski et al. 2006). Do badań porównawczych wybrano dwa, skrajnie odmienne środowiska: zadrzewienie śródmiejskie (park miejski) oraz rezerwat torfowiskowy „Redykajny” na obrzeżach Olsztyna. Celem badań było poznanie składu gatunkowego i liczebności chrząszczy z rodziny biegaczowatych (*Carabidae*) na terenach, różniących się stopniem antropopresji. Wybrane wyniki tych badań zostały przedstawione w Tabeli 6.

Tabela 6. Zależność wielkości zoofagów od stopnia antropopresji*.

Stanowisko	Wielkość występujących zoofagów	Dominujące gatunki
Zadrzewienie śródmiejskie, park miejski na terenie Olsztyna	Małe i średnie zoofagi	<i>Calathus fuscipes</i> , <i>Carabus nemoralis</i> , <i>Pterostichus niger</i>
Rezerwat torfowiskowy na obrzeżach Olsztyna	Średnie i duże zoofagi	<i>Carabus hortensis</i> , <i>Carabus granulatus</i> , <i>Pterostichus niger</i>

*na podstawie wyników badań: Nietupski et al. 2006

Na obszarze znajdującym się pod ciągłym wpływem człowieka, jakim jest park miejski dominowały małe i średnie zoofagi. Występowały między innymi takie gatunki jak: *Calathus fuscipes*, *Carabus nemoralis*, *Pterostichus niger*. Na terenie rezerwatu torfowiskowego „Redykajny”, gdzie wpływ człowieka był nieznaczny odnotowano przewagę obecności dużych i średnich zoofagów: *Carabus hortensis*, *C. granulatus*, *P. niger*. Na badanych stanowiskach stwierdzono również znaczne różnice w składzie gatunkowym chrząszczy. Gatunki, które pojawiały się na terenie torfowiska nie pojawiały się w parku miejskim, a gatunki związane

ze śródmiejskimi zadrzewieniami nie wystąpiły na terenie rezerwatu. Wyjątek stanowił *Pterostichus niger*, którego obecność odnotowano na obydwu stanowiskach, zatem gatunek ten nie może być wykorzystywany do oceny wpływu oddziaływania człowieka na zmienność środowiska. Większy udział dużych zoofagów wskazywał na siedlisko stabilne, natomiast udział małych zoofagów wskazuje na zmienność i niestabilność środowiska pod wpływem antropopresji. Ponadto wyraźny wpływ czynników antropogenicznych zaznacza się w zwiększeniu udziału gatunków terenów otwartych i zmniejszeniu udziału typowych gatunków leśnych (Nietupski et al. 2006).

Wyniki innych badań wskazują, że zmiany w drzewostanie, również inicjują zmiany w zespołach chrząszczy. Zależność taką obserwowano na powierzchniach pohuraganowych, w drzewostanach sosnowych Puszczy Piskiej. Pod uwagę wzięto przede wszystkim zmiany w liczebności i składzie gatunkowym chrząszczy saproksylicznych po przejściu huraganu (Gutowski et al. 2010). Silny wiatr, z dnia 4 lipca 2002 r. spowodował zniszczenie drzewostanów na dużym obszarze Puszczy. Przyczynił się do powstania dużej ilości martwego drewna zalegającego na dnie lasu. W konsekwencji znacznym zmianom uległa również liczebność organizmów saproksylicznych, w tym chrząszczy (Gutowski et al. 2010).

Badania na terenach pohuraganowych Puszczy Piskiej przeprowadzono dwukrotnie, w roku 2005, a następnie w roku 2007, na trzech obszarach badawczych: 1 - Las gospodarczy silnie uszkodzony przez huragan; 2 - Las referencyjny „Szast”, uszkodzony przez wiatr, w mniejszym stopniu niż Las gospodarczy; 3 - Las gospodarczy nie zniszczony przez huragan (kontrolny). Wyniki dotyczące liczebności i bogactwa gatunkowego chrząszczy przedstawiono w Tabeli 7 (Gutowski et al. 2010).

Tabela 7. Liczebność i bogactwo gatunkowe chrząszczy w dwóch okresach badawczych na terenach pohuraganowych Puszczy Piskiej*.

Teren badań	2005			2007		
	Liczebność	Ogólna liczba gatunków	Liczba gatunków saproksylicznych	Liczebność	Ogólna liczba gatunków	Liczba gatunków saproksylicznych
1. Las gospodarczy uszkodzony przez huragan	9 758	458	229	3492	167	108
2. Las referencyjny „Szast”	7 167	407	223	1940	130	82
3. Las gospodarczy niezniszczony przez huragan (kontrolny)	-	-	-	894	123	86

*na podstawie wyników badań: (Gutowski et al. 2010).

Uzyskane wyniki wykazały, że trzy lata po przejściu huraganu nastąpiło zwiększenie liczebności i liczby gatunków chrząszczy. Wyraźnie więcej osobników odłowiono w lasach silnie zniszczonych przez huragan niż w lasach uszkodzonych przez wiatr w mniejszym stopniu. Ogromna ilość zalegającego martwego drewna spowodowała, że gatunki saproksyliczne stanowiły ponad połowę wszystkich odłowionych gatunków chrząszczy. Duże różnice w liczebności i bogactwie gatunkowym chrząszczy w 2005 i 2007 rok należy tłumaczyć faktem uprzątnięcia z lasu wiatrowałów pomiędzy dwoma okresami badawczymi. Skutkiem tego zabiegu był prawie trzykrotny spadek liczebności odłowionych osobników, trzykrotny spadek liczby wszystkich występujących na tym terenie gatunków i ponad dwukrotny spadek liczby gatunków chrząszczy saproksylicznych (Gutowski et al. 2010).

4. Motyle jako bioindykatory

Motyle najczęściej wykorzystywane są w bioindykacji jako wskaźniki zanieczyszczenia powietrza. Jednak równie dobrze mogą służyć jako

wskaźniki stopnia zaawansowania sukcesji, zmian warunków siedliskowych, a także wskazywać na obecność gatunków roślin czy zwierząt w środowisku, z którymi wchodzi w różnoraki powiązania.

Prawdopodobnie najbardziej znanym gatunkiem motyla reagującego na zmiany zanieczyszczenia powietrza jest krępak nabrzozak (*Biston betularia*). Pierwszy raz zwrócono uwagę na ten gatunek w Anglii w okolicach Manchesteru. Początkowo spotykana była jedynie odmiana jasna tego motyla (odmiana *typica*). Jednak wraz z postępem procesu industrializacji i wzrastającym zanieczyszczeniem powietrza motyl zaczął zmieniać ubarwienie na ciemniejsze (odmiana *carbonaria*). Ostatecznie to ciemna forma zaczęła dominować, zwłaszcza na terenach silnie uprzemysłowionych. Stwierdzono, że zanieczyszczenie powietrza, głównie sadze i pyły, powodowały pociemnienie kory drzew, na których odmiana jasna stała się bardziej widoczna. W zmienionych warunkach ciemniejsza barwa umożliwiała lepsze maskowanie się przed drapieżnikami. Zjawisko to nazwano melanizmem przemysłowym. Obecnie wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej i troską o środowisko naturalne poziom zanieczyszczenia powietrza w niektórych rejonach zaczyna się zmniejszać. Znajduje to potwierdzenie w coraz częstszym pojawianiu się odmiany *typica* w tych rejonach (Kozłowski 2012).

Najnowsze badania wskazują na szczególną wrażliwość motyli na skażenie radioaktywne. Sugerują to wyniki badań japońskich naukowców przeprowadzone po awarii elektrowni jądrowej w Fukushima, która miała miejsce w 2011 roku. Dwa miesiące po katastrofie naukowcy zebrali 144 motyle z rodziny modraszkwatych (*Lycaenidae*) z dziesięciu regionów Japonii. U owadów pochodzących z terenów o wysokim wskaźniku napromieniowania stwierdzono poważne zmiany morfologiczne: znaczne zmniejszenie skrzydeł, zwiększenie odnóży i nieregularnie rozwinięte oczy. U motyli, pochodzących z terenów o mniejszym napromieniowaniu radioaktywnym, takich zmian nie zaobserwowano (Hiyama et al. 2012).

Wiadomo jest, że budowa ciała motyli charakteryzuje ich zdolności dyspersyjne i zależna jest od warunków środowiskowych oraz od

zmienności ekosystemu w jakim występują. Taką zależność przedstawiają wyniki w Tabeli 8 (Krejckant 2006).

Tabela 8. Typ ekosystemu a budowa ciała i zdolności dyspersyjne motyli*.

Typ ekosystemu	Cechy charakterystyczne motyli
Ekosystem na wcześniejszych etapach sukcesji, podlegający ciągłym zmianom	Motyle są większe i silniejsze; Zdolne do migracji
Ekosystem stabilny	Motyle są mniejsze i słabsze Brak konieczności migrowania

*na podstawie wyników badań: Krejckant (2006)

Według Krejckanta (2006) motyle żyjące w niestabilnych środowiskach reprezentujących początkowe stadia sukcesji są proporcjonalnie większe i silniejsze. Zjawisko to uwarunkowane jest potrzebą przemieszczania się. Zmieniające się warunki środowiska zmuszają motyle do migrowania i poszukiwania miejsc spełniających wymagania gatunku. Stabilny ekosystem natomiast zapewnia motylom stałe warunki i co za tym idzie brak konieczności dalszych wędrówek. Motyle, które nie muszą się stale przemieszczać i przystosowywać do opanowywania nowych siedlisk są najczęściej mniejsze i słabsze. Autor badań stwierdza, że obecność motyli o mniejszych rozmiarach wskazuje na stabilny ekosystem, natomiast występowanie większych osobników jest symptomatyczne dla układów o dużej zmienności, w których procesy sukcesyjne wciąż postępują (Krejckant 2006).

Naturalna zmienność ekosystemów powoduje konieczność przystosowywania się motyli do nowych warunków siedliska, o czym świadczą na przykład zdolności dyspersyjne motyli. Zmiany w środowisku wywołane presją antropogeniczną są dla tych owadów o wiele bardziej niebezpieczne, o czym świadczy reakcja motyli modraszkwatych (*Maculinea*). Najczęściej preferowanymi przez nie są tereny suche i trawiaste: pola, łąki i ugory. Należy podkreślić, iż siedliska kserofilne w Polsce są rozproszone i zwykle zajmują niewielkie powierzchnie, dlatego tak ważne jest właściwe użytkowanie ziemi w celu ochrony tych motyli (Sielezniew, Stankiewicz 2006).

Na skutek intensyfikacji użytkowania zbiorowisk trawiastych, nieodpowiedniego terminu koszenia (niedostosowania terminu koszenia do okresu aktywnością motyli i kwitnienia rośliny żywicielskiej), stosowania pestycydów czy nawozów sztucznych, wiele gatunków motyli modraszkwatych zanika. Powodem ginięcia tych owadów jest również inne działanie człowieka jakim jest zalesianie terenów otwartych. Efektem tego typu zabiegów jest utrata zbiorowisk trawiastych, jedynych siedlisk zapewniających modraszkwatym optymalne warunki rozwoju. Szczególnie wrażliwe na zmiany środowiskowe są motyle z rodzaju *Maculinea*, a zbyt silna presja antropogeniczna może powodować nieodwracalną destrukcję ich populacji. Niewłaściwe użytkowanie gruntu pociąga zmiany warunków siedliskowych i przyczynia się również do zaniku gatunków roślin, z którymi motyle te są silnie związane (Sieleźniew, Stankiewicz 2006).

Niektóre motyle z rodziny modraszkwatych wykazują silne związki z konkretnymi taksonami roślin. Często zależności są tak silne, że w przypadku ustąpienia danego gatunku rośliny ginie również gatunek motyla. Przykładem może być związek *Maculinea arion* z macierzanką piaskową (*Thymus serpyllum*). Obecność tego modraszka to wskaźnik obecności macierzanki piaskowej w środowisku – jedynej i niezbędnej dla przetrwania motyla rośliny żywicielskiej. Inny gatunek *Maculinea rebeli* może być wykorzystany jako wskaźnik obecności goryczki krzyżowej (*Gentiana cruciata*), będącej dla niego miejscem składania jaj (Sieleźniew, Stankiewicz 2006).

Modraszkwate mogą być wykorzystywane również jako wskaźniki obecności innych grup owadów w środowisku ze względu na istnienie silnych powiązań między nimi. Na przykład występowanie gatunku motyla *Maculinea nausithous* wskazuje na obecność mrówki *Myrmica rubra*, która w swoich mrowiskach zapewnia miejsce oraz stwarza optymalne warunki dla rozwoju larw i poczwerek motyla (Sieleźniew, Stankiewicz 2006).

Omówione przykłady świadczą o tym, że motyle mogą z powodzeniem być wykorzystywane w bioindykacji jako wskaźniki obecności

wielu gatunków roślin i zwierząt w środowisku, z którymi wspólnie występują i z którymi na różnych etapach cyklu życiowego wchodzą w mniej lub bardziej obligatoryjne interakcje (Sieleźniew, Stankiewicz 2006).

Podsumowanie

Bioindykacja, jako metoda oceny stanu środowiska opiera się na obserwacji reakcji organizmów żywych na zmiany zachodzące w środowisku. Prawie we wszystkich grupach zwierząt odnaleźć można gatunki silnie reagujące na zmiany środowiska. Owady jako jedna z najliczniejszych grup, cechująca się ogromną różnorodnością gatunkową i występowaniem prawie we wszystkich typach środowisk może być z powodzeniem stosowana w bioindykacji, zarówno do oceny przekształceń ekosystemów w wyniku działalności człowieka jak i naturalnej zmienności środowisk.

Omawiane trzy grupy owadów: mrówki, chrząszcze i motyle posiadają wiele cech dobrego bioindykatora. Wszystkie trzy grupy charakteryzują się szerokim rozprzestrzenieniem w środowisku, dużą liczebnością i są stosunkowo łatwe do złowienia ilościowego. Trudna natomiast jest identyfikacja taksonomiczna złowionych osobników, co może być przeszkodą dla nie specjalistów i co ogranicza wykorzystanie tych owadów jako biowskaźników na szerszą skalę. Ogromna liczba gatunków i niezwykle subtelne różnice między nimi sprawiają, że wykorzystywanie tych owadów do oceny stanu środowiska jest możliwe przede wszystkim dla doświadczonego badacza. Dlatego należy dążyć do szerszego włączenia tych trzech grup owadów do programów monitoringowych, w których udział wielu naukowców w tym entomologów będzie gwarantem rzetelnej identyfikacji owadów, interpretacji wyników i ich wykorzystanie w badaniach bioindykacyjnych.

Bibliografia

- Borowski J., 2007, *Chrzęszcze Insecta, Coleoptera – jako wskaźniki naturalności drzewostanów*, w: Anderwald D. (red.). Siedliska i gatunki wskaźnikowe w lasach. Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej, 16, zeszyt 2/3, 510–518.
- Byk A., Mokrzycki T., 2007, *Chrzęszcze saproksyliczne jako wskaźnik antropogenicznych odkształceń Puszczy Białowieskiej*, w: Anderwald D. (red.). Siedliska i gatunki wskaźnikowe w lasach. Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej, 16, zeszyt 2/3, 475–509.
- Gutowski J. M., Buchholz L., Kubisz D., Ossowska M., Sućko K., 2006, *Chrzęszcze saproksyliczne jako wskaźnik odkształceń ekosystemów leśnych borów sosnowych*, Leśne prace badawcze, vol. 4, 101–144.
- Gutowski M. J., Kibisz D., Sućko K., Zub K., 2010, *Sukcesja saproksylicznych chrzęszczy (Coleoptera) na powierzchniach pohuraganowych w drzewostanach sosnowych Puszczy Piskiej*, Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers), vol. 71, 279–298.
- Hiyama A., Nohara Ch., Kinjo S., Taira W., Gima S., Tanahara A., Otaki J.M., 2012, *The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly*, Scientific Reports 2: 570, <http://www.nature.com/srep/2012/120809/srep00570/pdf/srep00570.pdf>.
- Jaworska M., Gospodarek J., 2004, *Organizmy glebowe i ich aktywność jako wskaźnik stanu środowiska w warunkach zanieczyszczenia gleby substancjami ropopochodnymi*, Zesz. Prob. Nauk Roln. vol. 501, PAN, Szczecin, 189–194.
- Kozłowski J., 2012, *Mechanizmy ewolucji dla studiów biologiczno-geograficznych i ewolucjonizmu dla ochrony środowiska*, Instytut Nauk o Środowisku, UJ, Materiały wykładowe, slajd 26-28 http://www.eko.uj.edu.pl/~kozlo/pliki/ewol_ochr_biolgeo_2012_A.pdf.
- Krejckant M., 2006, *Motyle dzienne (Rhopalocera) krajobrazu rolniczego okolic Mławy*, Praca dyplomowa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Biologii, Olsztyn, <http://www.uwm.edu.pl/czachor/publik/mgr/KREJCKANT.pdf>.

- Mazur S., 2004, *Dynamika i kierunki zmian zgrupowań epigeicznych mrówek (Formicidae) w procesie spontanicznego odtwarzania lasu*, Sylwan, vol. 1, 12–18.
- Nietupski M., Kosewska A., Ciepielewska D., 2006, *Porównanie zgrupowań Carabidae (Coleoptera) rezerwatu torfowiskowego „Redykajny” i zadrzewienia śródmiejskiego Olsztyna*, Wiad. Entomol., vol. 25, Supl. 1, 61–70, Poznań.
- Puszkarski T., 1997, *Próby zastosowania bioindykatorów faunistycznych do oceny oddziaływania Zakładów Azotowych w Puławach na otaczające je lasy*, w: *Waloryzacja ekosystemów leśnych metodami zoindykacyjnymi: VI Sympozjum ochrony ekosystemów leśnych*. Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa, 112–117.
- Ribas C. R., Solar R. C., Campos R. B. F., Schmidt F. A., Valentim C. L., Schoereder J. H., 2012, *Can ants be used as indicators of environmental impacts caused by arsenic?* J. Insect. Conserv., vol. 16, 413–421.
- Roo-Zielińska E., Solon J., Degórski M., 2000, *Ocena stanu i przekształceń środowiska przyrodniczego na podstawie wskaźników geobotanicznych, krajobrazowych i glebowych (podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań)*, Monografie, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego, PAN, Warszawa, 2007, http://www.rcin.org.pl/Content/141/WA51_250_r2007-t9_Monografie.pdf.
- Rybak J., 2008, *Wpływ zanieczyszczeń siarkowych na makrobezkręgowce na obszarze Karkonoszy (Sudety, Polska)*, Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Zakład Biologii i Ekologii, http://www.pzits.not.pl/docs/ksiazki/Ekotoks_2008/Rybak%20335-342.pdf.
- Schmidt F. A., Ribas C. R., Schoereder J. H., 2013, *How predictable is the response of ant assemblages to natural forest recovery? Implications for their use as bioindicators*, Ecological Indicators, vol. 24, 158–166.
- Sielezniew M., Stankiewicz A. M., 2006, *Ekologiczne, prawne i praktyczne aspekty ochrony motyli w Polsce na przykładzie modraszków*

Maculinea spp. (*Lepidoptera: Lycaenidae*), *Wiad. Entomol.*, vol. 25, Supl. 2, 179-188.

Skibińska E., Chudzicka E., 2000, *Owady w monitoringu przyrodniczym*, w: Nowacki J. (red.), *Ochrona owadów w Polsce u progu integracji z Unią Europejską*, *Wiadomości entomologiczne*, vol. 18, Suplement 2, Poznań, 289-301, http://pte.au.poznan.pl/we/archiv/WE18_Supl-2.pdf.

Skłodowski J., 2010, *Fauna epigeiczna – Biegaczowate*, w: Olszewski A. (red.), *Raport o stanie środowiska przyrodniczego zlewni zintegrowanego monitoringu środowiska przyrodniczego „Pożary” w 2009*, Granica–Izabelin, KPN, 129-145.