

Anna Matwiejuk

MONITORING ŚRODOWISKA Z WYKORZYSTANIEM POROSTÓW

Anna Matwiejuk, dr – Uniwersytet w Białymstoku

adres korespondencyjny:

Instytut Biologii

ul. Świerkowa 20 B, 15-950 Białystok

e-mail: matwiej@uwb.edu.pl

MONITORING OF ENVIRONMENT WITH USE OF LICHENS

SUMMARY: Bioindication is a method of assessing the state of the environment, especially pollution, based on the survey responses of living stenobionts organisms reaction (indicator organisms) to the changes. Stenobionts are species with a narrow ecological tolerance to the given agent. If you know the factor which makes it sensitive and on what condition favor is based their presence in the environment we can estimate the presence of a specific environmental factor. Among the universal bioindicators are also lichens = lichenicolous fungi. Lichens (Lichenes) are fascinating organisms which thallus is build from two components – photobiont (algae and/or cyanobacterium) and mycobiont (fungus – Ascomycetes, or less Basidiomycetes or imperfect fungus). The paper presents the biological characteristics of lichens (described their morphology, anatomical, physiological characteristics), as one of the best indicator organisms and the use of lichens in atmospheric aerosol pollution biomonitoring. The paper describes field and laboratory methodology (1. test methods for the study of biodiversity and abundance of lichens, 2. anatomical and morphological mehtods, 3. physiological methods, 4. chemical analytical methods). Data on lichenoidication research conducted in Poland were collected, so as the methodology on collecting and processing the results and observations were learnt and obtained. In addition, the role of lichens as indicators of natural and lowland forests and as indicators of climate change has been described.

KEY WORDS: lichens, bioindicators, lichenoidication

Wstęp

Porosty stanowią klasyczny przykład wskaźników stanu środowiska, w tym stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego i stanu jego naturalności. Porosty to ekologiczne układy złożone najczęściej z dwóch komponentów – cudzożywnego grzyba i samożywnego glona. Glon i grzyb tworzą organizm o odmiennych właściwościach, organizm symbiotyczny, który ze względu na swoistą gospodarkę wodną, cechy anatomiczne i sposób odżywiania może zasiedlać miejsca nie dostępne dla innych organizmów. Plechy porostów mają postać różnobarwnych skorupiastych nalotów ściśle przyrośniętych do podłoża, łuseczek, listków bądź krzaczków. Porosty jako organizmy zmiennowodne, mają plechy silnie higroskopijne, co sprawia, że szybko absorbują zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Inną cechą charakteryzującą porosty jest wyjątkowo duża wrażliwość na zmiany warunków siedliskowych, wywołane głównie przez czynniki antropogeniczne. Celem pracy jest ocena:

- roli porostów w monitoringu biologicznym zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego;
- właściwości porostów jako wskaźników zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego;
- i przegląd metod lichenindykacyjnych wykorzystujących porosty jako czułe biowskaźniki zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego;
- roli porostów jako wskaźników naturalności lasów;
- roli porostów jako wskaźników zmian klimatu.

Porosty jako czułe wskaźniki zmian środowiska

Porosty (grzyby zlichenizowane) należą do królestwa grzybów Mycota. Są plechowymi organizmami symbiotycznymi, złożonymi z dwóch komponentów autotroficznego glonu (fotobionta) i heterotroficznego grzyba (mykobionta). Wzajemne zależności pomiędzy partnerami są różnie traktowane od helotyizmu (niewolnictwa), poprzez grzybopasożytnictwo, glonopasożytnictwa do symbiozy. Najczęściej wzajemne relacje pomiędzy partnerami tłumaczy się jako symbiozę mutualistyczną, gdzie glon pobudzany jest przez substancje (głównie kwas askorbinowy) wytwarzane przez grzyb do fotosyntezy. Grzyb natomiast dostarcza glonom wody wraz z substancjami mineralnymi, stwarza mu schronienie oraz chroni go przed niską temperaturą. Plecha porostów tworzy nową jakość w stosunku do każdego z komponentów, przy czym pewne cechy anatomiczno-morfologiczne nie są przez nie zatracane. Glonami najczęściej tworzącymi plechy porostów są zielenice (Chlorophyta, na przykład: *Coccomyxa*, *Trentepohlia*, *Chlorella*, *Pleurococcus*) oraz sinice (Cyanophyta, przykładowo: *Nostoc*, *Scytonema*, *Gloeocapsa*, *Xanthocapsa*). Mykobiontem są najczęściej grzyby workowce (Ascomycota).

Porosty pojawiły się na ziemi w okresie dewońskim, około 335 – 408 milionów lat temu¹. Obecnie szacuje się, że na świecie żyje około 13 500 gatunków porostów, w tym 1554 w Polsce².

O historii badań nad porostami pisał J. Bystrek³. Termin *Lichen* do nauki wprowadził Teofrast z Eresos (370-288 p.n.e.), uczeń Arystotelesa, jednakże rośliny opisywane pod tą nazwą należały przeważnie do mszaków, głównie wątrobowców. Historię badań nad porostami tworzyli m. in. w XVII wieku Tournefort (1656-1708) i Linneusz (1707-1778), na przełomie XVIII i XIX wieku Acharius (1757-1819), autor dzieła *Lichenographia universalis* oraz Fries (1794-1878), Wallroth (1792-1857), de Notaris (1805-1877), Koerber (1817-1885) i Nylander (1822-1899)⁴. W 1867 roku Schwendener (1829-1919) wysunął przypuszczenie o dualistycznej naturze porostów, uznając je za wspólnotę życiową glonu i grzyba⁵.

Porosty są organizmami zmiennowodnymi (poikilohydrowymi). Stopień uwodnienia ich plech jest zależny od stopnia wilgotności powietrza. Porosty pobierają wodę atmosferyczną z powietrza (głównie w postaci pary wodnej), całą powierzchnią plechy bez jej uprzedniego przejścia w stan ciekły, w sposób czysto fizyczny, w cyklu dobowym⁶.

Specyficzną cechą porostów jest zdolność wytwarzania wtórnych substancji porostowych, zwanych kwasami porostowymi. W formie kryształów, granulek lub w formie ciekłej gromadzą się one między innymi na powierzchni strzępek miąższu, w soraliach, rzadziej w warstwie korowej plechy. Są nierozpuszczalne w wodzie. Ich udział, w zależności od gatunku, wynosi od 0,5 do 10% suchej masy porostów. Kwasy porostowe są wytwarzane przez grzyba z wykorzystaniem węglowodanów produkowanych przez glony – glukozę przez sinicę oraz rybitol, erytrytol i sorbitol przez zielenice w różnych szlakach metabolicznych. Rodzaj i ilość wytwarzanych kwasów porostowych są różne dla poszczególnych gatunków porostów. Opracowane są metody identyfikacji gatunków porostów na podstawie analizy zawartych w nich kwasów (chemotaksonomia – reakcje testowe, chromatografia cienkowarstwowa TLC).

¹ T.N. Taylor, H. Hass, W. Remy, H. Kero, *The oldest fossil lichen*, "Nature" 1995 nr 378, s. 244.

² W. Fałtynowicz, *The lichens lichenicolous and allied fungi of Poland. An annotated checklist. Krytyczna lista porostów i grzybów naporostowych Polski*, Institute of Botany, Polish Academy of Science, Kraków 2003, s. 435.

³ J. Bystrek, *Podstawy lichenologii*, Wyd. Uniwersytetu M. Curie-Skłodowskiej, Lublin 1997, s. 11-19.

⁴ A. Kłos, *Porosty bio wskaźniki i biomonitory zanieczyszczenia środowiska*, „Chemia. Dydaktyka. Ekologia. Metrologia” 2007 nr 12(1-2).

⁵ J.J. Bystrek, op. cit., s. 11-19.

⁶ A. Matwiejuk, *Porosty Białegostoku, jako wskaźniki zanieczyszczenia atmosfery*, Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok 2007.

Monitoring biologiczny

Bioindykacja jest metodą oceny stanu środowiska, głównie poziomu zanieczyszczeń, na podstawie badania reakcji organizmów żywych stenotypowych (organizmów wskaźnikowych) na zmiany. Stenobionty są gatunkami o wąskim zakresie tolerancji ekologicznej na dany czynnik. Jeśli wiadomo, na jaki czynnik są wrażliwe i jakie warunki preferują, to na podstawie ich obecności w środowisku można wnioskować o działaniu lub występowaniu określonego czynnika środowiskowego.

Właściwości bioindykacyjne mogą się przejawiać na poziomie:

- komórek (cechy biochemiczne i fizjologiczne);
- tkanek i organów (cechy anatomiczne i fizjologiczne);
- całych organizmów (cechy morfologiczne i anatomiczne);
- populacji i biocenoz (cechy troficzne i konkurencyjne).

W zależności od sposobu reagowania na określone czynniki środowiskowe można wyróżnić następujące kategorie bioindykacyjne:

- skala gatunków – obecność lub brak gatunków wrażliwych na określony czynnik środowiskowy;
- wskaźniki akumulacji – organizmy gromadzące w swoich tkankach substancje toksyczne;
- wskaźniki reagujące – organizmy wskazujące różny stopień uszkodzenia swoich organów pod wpływem działających czynników środowiskowych;
- biomarkery – kategoria bioindykatorów wskazujących zmiany na poziomie biochemicznym, immunologicznym i genetycznym.

Lichenoindykacja

Lichenoindykacja jest jedną z metod bioindykacji, która wykorzystuje porosty (*Lichenes*) jako organizmy biowskaźnikowe. Fizyczny sposób gospodarowania wodą sprawił, że porosty posiadają bardzo duże możliwości kumulowania substancji rozpuszczonych w wodzie atmosferycznej. Możliwości wykorzystywania asymilatów symbiotycznego partnera i substancji mineralnych emitowanych do atmosfery uniezależniły porosty od podłoża i pozwoliły na opanowanie pionierskich siedlisk. Oparcie procesów fizjologicznych o wodę atmosferyczną sprawiło, że podstawowym warunkiem istnienia porostów jest jej jakość, stopień zanieczyszczenia. Dzięki wykorzystaniu wody zawartej w powietrzu opanowały różnorodne siedliska i jednocześnie jako pierwsze zareagowały na zwiększające się zanieczyszczenie atmosfery różnymi substancjami, w naszych warunkach głównie tlenkami siarki, azotu i ołowiu⁷.

W odróżnieniu od roślin, porosty odznaczają się dużą odpornością na takie czynniki, jak skrajne temperatury, brak wody i krótki okres wegetacyjny, a jedno-

⁷ J. Bystrek, op. cit., s. 103-107.

częściej odznaczają się największą wrażliwością na zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego⁸.

Wyjątkowa wrażliwość porostów na zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego w porównaniu z innymi roślinami wynika z:

- braku tkanki okrywającej, co stwarza możliwość bezpośredniej infiltracji gazów, pyłów i roztworów do wnętrza plech; wymiana gazowa u porostów odbywa się całą powierzchnią plechy, w ten sposób wszelkie zanieczyszczenia znajdujące się w powietrzu dostają się bez trudu do wnętrza organizmu;
- małej zdolności przystosowywania się do zmieniających się warunków środowiska;
- niskiej tolerancji glonu na zanieczyszczenia, wynikająca z podatności chlorofilu na dezaktywację;
- bardzo małej zawartości chlorofilu w plechach na jednostkę suchej masy, co sprawia, że rozkład chlorofilu pod wpływem toksyn daje efekty uszkodzenia wielokrotnie silniejsze niż u roślin;
- zmiany przepuszczalności błon, odczynu cytoplazmy, wpływ rozpuszczonych składników chemicznych na komórkowe układy redoks to pośrednie skutki skażeń;
- pobierania wody bezpośrednio z opadów atmosferycznych i pary wodnej, podczas gdy rośliny korzystają z wody częściowo przefiltrowanej przez glebę⁹.

Metody lichenindykacyjne

Metody wykorzystujące porosty do oceny zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego można podzielić na:

- metody terenowe:
 - metody polegające na badaniu bioróżnorodności i liczebności porostów;
- metody laboratoryjne:
 - metody anatomiczno-morfologiczne,
 - metody fizjologiczne,
 - metody analityczno-chemiczne.

W badaniach różnorodności i liczebności porostów najczęściej są stosowane skale porostowe, modyfikowane dla obszarów geograficznych w zależności od występujących tam gatunków porostów epifitycznych (nadrzewnych). Do celów lichenomonitoringu zostały przetestowane liczne gatunki porostów oraz granice wytrzymałości porostów w zależności od stopnia skażenia powietrza, zwłaszcza tlenkami siarki. Uczyniono to dzięki eksperymentalnym badaniom aktywności procesów metabolicznych, zwłaszcza fotosyntezy, oddychania, a następnie przez porównanie uzyskanych danych z ilością SO₂ w powietrzu. Wyliczone zostały

⁸ W. Fałtynowicz, *Wykorzystanie porostów do oceny zanieczyszczenia powietrza. Zasady, metody, klucze do oznaczania wybranych gatunków*, Centrum Edukacji Ekologicznej Wsi, Krosno 1995.

⁹ Ibidem.

roczne wartości SO_2 w atmosferze powodujące zahamowanie fotosyntezy¹⁰. Na podstawie takich badań opracowana została dla Wysp Brytyjskich pierwsza skala wrażliwości porostów¹¹ i podana procentowa wartość SO_2 dla określonych grup gatunków. Na podstawie występowania poszczególnych gatunków porostów rosnących na drzewach o dwóch odmiennych rodzajach kory – zeutrofizowanej i niezeutrofizowanej, D. L. Hawksworth i F. Rose¹² wyróżnili 10 stref, którym przyporządkowali odpowiednie średnie wartości stężeń SO_2 w miesiącach zimowych. Dzięki tej skali stało się możliwe porównywanie rozmieszczenia poszczególnych stref na różnych obszarach lub analiz ich zmian w czasie. Należy jednak pamiętać, że przy opracowywaniu tej skali, przy doborze gatunków kierowano się częstością ich występowania i odpornością na zanieczyszczenia powietrza w konkretnym rejonie Wielkiej Brytanii. Dlatego też wskazane jest każdorazowe dostosowywanie listy gatunków charakterystycznych dla poszczególnych stref do lokalnych warunków i miejscowej lichenobioty.

W Polsce skala biologiczna D. L. Hawkswortha i F. Rose¹³ została zmodyfikowana i przystosowana do warunków południowej Polski przez J. Kiszkę dla województwa krakowskiego¹⁴ i Przemysła¹⁵. Autor ten stosuje termin „strefa lichenoidykacyjna” i wyróżnia siedem stref: strefa I: stopień skali biologicznej 0 i 1 (według D. L. Hawkswortha, F. Rose 1970), strefa II: stopień skali biologicznej 2 i 3, strefa III: stopień skali biologicznej 4, strefa IV: stopień skali biologicznej 5, strefa V: stopień skali biologicznej 6, strefa VI: stopień skali biologicznej 7 i 8, strefa VII: stopień skali biologicznej 9 i 10.

Dane na temat zmian w występowaniu i obfitości porostów na poziomie gatunków i populacji, uzyskane w badaniach różnorodności i liczebności porostów są poddawane analizie w celu wykonania map, identyfikacji stref zubożenia różnorodności biologicznej porostów i wskazań, co do jakości powietrza. Tworzenie map dystrybucji rozpowszechnionych i wrażliwych porostów jest dość tanią i prostą metodą monitoringu jakości powietrza. Metoda ta rozróżnia strefy z różnym stopniem zanieczyszczenia. Wzory dystrybucji mogą obejmować obecność lub brak gatunków jako odpowiedź na zanieczyszczenia, zmniejszenie pokrycia gatunkami i rekolonizację gatunków wynikającą z poprawy jakości powietrza¹⁶.

¹⁰ J. Bystrek, op. cit., s. 254-263.

¹¹ D.L. Hawksworth, F. Rose, *Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens*, "Nature" 1970 nr 227, s. 145-148.

¹² Ibidem.

¹³ Ibidem.

¹⁴ J. Kiszka, *Lichenoidykacja obszaru województwa krakowskiego*, „Studia Ośrodka Dokumentacji Fizjograficznej” 1990 nr 18, s. 201-212.

¹⁵ J. Kiszka, *Porosty (Lichenes) oraz warunki bioekologiczne Przemysła*, „Arboretum Boleszyszyce” 1999 z. 6.

¹⁶ T.M. Traczewska, *Biologiczne metody oceny skażenia środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.

W badaniach różnorodności i liczebności porostów stosowane są także metody polegające na wyznaczaniu tak zwanego indeksu czystości atmosfery IAP (*Index of Atmospheric Purity*)¹⁷.

IAP umożliwia ocenę poziomu zanieczyszczenia powietrza, opartą na liczbie gatunków porostów (n), częstotliwości ich występowania (f) i tolerancji porostów na badanym terenie.

$$\text{Index of Air Purity (IAP)} = \sum_{i=1}^n f_i \quad (1)$$

Obliczenia indeksów czystości atmosfery określają wpływ źródła zanieczyszczeń na populację porostów. Jest to ilościowe podejście fitosocjologiczne, wymagające zbioru danych, takich jak częstość i procent pokrycia oraz uwzględnienie wiedzy dotyczącej ich tolerancji na substancje toksyczne. Wartości IAP zwiększają się, gdy zbiorowiska stają się bardziej złożone w miarę oddalania się od źródła emisji¹⁸.

Wartości IAP są zgrupowane w pięć poziomów jakości (tabela 1).

Metody anatomiczno-morfologiczne polegają na badaniu zmian w budowie anatomicznej i morfologicznej plech porostów spowodowanych czynnikami antropogennymi. Porównywany jest na przykład udział żywych i martwych komórek glonów oraz szybkość ich obumierania (metoda kondycji plech pustułki pęcherzykowatej *Hypogymnia physodes* na podstawie aktywności fotobionta *Trebouxia* – metoda mikroskopowa). W metodzie makroskopowej ocenia się stopień uszkodzeń plech porostów na podstawie wielkości zmian, przebarwień i nekroz na plechach. W obu metodach najczęściej wykorzystywana jest technika transplantacji porostów¹⁹, która polega na przeniesieniu porostów z obszarów mało zanieczyszczonych i ekspozycji na badanych obszarach, głównie miejskich i przemysłowych. Najczęściej stosuje się transplantację w miesiącach jesiennych i wiosennych, kiedy w środowisku miejskim panuje podwyższona wilgotność powietrza, związana z występowaniem częstych opadów i mgieł przy równoczesnym wzmożonym obciążeniu atmosfery zanieczyszczeniami. W konsekwencji w okre-

¹⁷ P. Czarnota, *Porosty jako indykatory zanieczyszczenia środowiska. Przegląd metod lichenoidykacyjnych*, „Przegląd Przyrodniczy” 1998 nr IX(1/2), s. 55-72; R. Kricke, S. Loppi, *Bioindication: The I.A.P. Approach*, w: P.L. Nimis, C. Scheidegger, P.A. Wolseley, *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 2000, s. 21-38; M.E. Conti, G. Cecchetti, *Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review*, „Environmental Pollution” 2001 nr 114, s. 471-492; K. Szczepaniak, M. Biżuk, *Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution*, „Environmental Research” 2003 nr 93, s. 221-230; T.M. Traczewska, op. cit.

¹⁸ T.M. Traczewska, op. cit.

¹⁹ F. LeBlanc, D.N. Rao, G. Comeau, *Indices of atmospheric purity and fluoride pollution pattern in Arvida*, „Canadian Journal of Botany” 1972 nr 50, s. 991-998; L. Pustelniak, *Application of the transplantation method in studies on the influence of the urban environment upon the vitality of Hypogymnia physodes (L.) Nyl. thalli*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prace Botaniczne” 1991 nr 22, s. 193-201; A. Kepel, *Porosty Poznania jako wskaźniki zanieczyszczenia atmosfery, praca doktorska (manuskrypt)*, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań 1999; A. Matwiejuk, op. cit.

Tabela 1
Poziomy jakości indeksu czystości atmosfery (IAP)

Poziom	Wartość	Interpretacja
Poziom A	$0 \leq \text{IAP} \leq 12.5$	Bardzo wysoki poziom zanieczyszczenia
Poziom B	$12,5 < \text{IAP} \leq 25$	Wysoki poziom zanieczyszczenia
Poziom C	$25 < \text{IAP} \leq 37.5$	Umiarkowany poziom zanieczyszczenia
Poziom D	$37,5 < \text{IAP} \leq 50$	Niski poziom zanieczyszczenia
Poziom E	$\text{IAP} > 50$	Bardzo niski poziom zanieczyszczeń

Źródło: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, www.krdl.din.de [20-12-2013].

sie tym wytwarza się bardzo niekorzystny układ współzależności: wydłużony okres uwodnienia plech prowadzący do zwiększenia aktywności fizjologicznej i tym samym ułatwionego pobierania substancji toksycznych przy równoczesnym zwiększeniu zanieczyszczenia atmosfery.

Metody fizjologiczne polegają na ocenie zmian aktywności procesów życiowych zachodzących w porostach pod wpływem toksyn zawartych w powietrzu. Przykładem jest pomiar zmian konduktywności wody po zanurzeniu w niej porostów, wywołany wyciekaniem jonów z wnętrza komórek wskutek uszkodzenia błon komórkowych²⁰. Bada się także intensywność wydzielania etylenu C_2H_4 , nadmiernie wytwarzanego przez porosty pod wpływem toksyn²¹.

Często badanym wskaźnikiem są zmiany aktywności fotosyntetycznej glonów. Fabiszewski i inni (1983) na podstawie zmian intensywności fotosyntezy transplantowanych plech *Hypogymnia physodes*, obejmujących zakres od całkowitej inhibicji tego procesu do wartości 80% kontroli, określili pięć stref skażeń środowiska i izolinie stężeń dwutlenku siarki wokół Zakładów w Lubińskim Zagłębiu Miedziowym. Średnie dwumiesięczne stężenia SO_2 wyznaczone na podstawie zmian fotosyntezy transplantowanego porostu, w najbliższym otoczeniu huty wynosiły od 0,4 do 0,025 mg/m^3 . Natomiast w odległości 1,0-1,5 km od emitora obliczone stężenie dwutlenku siarki przekraczało wartość 0,4 mg/m^3 . Pomiarzy intensywności fotosyntezy przeprowadzono w układzie zamkniętym wykorzystując analizator CO_2 Infralyt III²².

²⁰ J. Garty, S. Tomer, T. Levin, H. Lehr, *Lichens as biomonitors around a coal-fired power station in Israel*, "Environmental Research" 2003 nr 91, s. 186-198.

²¹ E. Epstein, O. Sagej, J.D. Cohen, J. Garty, *Endogenous auxin and ethylene in the lichen Ramalina duriaei*, "Plant Physiology" 1986 nr 82, s. 1122-1125; J. Garty i in., *Comparison of five physiological parameters to assess the vitality of the lichen Ramalina lacera exposed to air pollution* "Physiologia Plantarum" 2000 nr 109, s. 410-418.

²² J. Fabiszewski, T. Brej, K. Bielecki, *Fitoindykacja wpływu huty miedzi na środowisko biologiczne*, „Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego” 1983 nr B 207, s. 1-110.

Pomocniczą rolę w ocenie stopnia skażenia atmosfery stanowią pomiary zawartości chlorofilu i feofityny w transplantowanych porostach²³.

W badaniach aktywności procesów fizjologicznych stosowane są metody fluorescencyjne, które można wykorzystywać w terenie (*in situ*), unikając w ten sposób możliwych zmian fizjologicznych, wywołanych transportem oraz przechowywaniem porostów „laboratoryjny stres komórek”²⁴.

Metody analityczno-chemiczne polegają na analizie składu chemicznego porostów: mikropierwiastków i makropierwiastków kumulowanych w ich plechach. Ze względu na budowę anatomiczną porosty charakteryzują się zdolnościami sorpcyjnymi, zwłaszcza do jonów metali. Pobierają one wodę i zawarte w niej substancje, wraz z zanieczyszczeniami, całą powierzchnią plechy²⁵. Stosując lichenindykacyjne metody analityczno-chemiczne wyznacza się strefy zanieczyszczenia środowiska oraz bada źródła i kierunki rozprzestrzeniania się polutantów. Prowadzone badania miały na celu między innymi ocenę i monitoring zanieczyszczenia środowiska na przykład w pobliżu zakładów produkcyjnych, aglomeracji miejskich i naturalnych emitorów (na przykład wulkanów). Dotyczyły one także metod analizy i kierunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń na terenach nieuprzemysłowionych oraz korelacji między zawartością pierwiastków śladowych w plechach porostów, w powietrzu i w glebie²⁶.

Korelacje między zawartością śladowych zanieczyszczeń w porostach i w środowisku uzależnione są od wielu czynników, między innymi: fizykochemicznych właściwości podłoża, na którym rosną porosty, od rodzaju związków chemicznych, w jakich występują w atmosferze badane pierwiastki śladowe, a szczególnie od ich preferencji do tworzenia w środowisku wodnym form jonowych (sorpcja w warstwie kationoaktywnej) oraz od warunków klimatycznych i topografii terenu²⁷.

²³ Ibidem; K. Boonpragob, *Monitoring physiological change in lichens: total chlorophyll content and chlorophyll degradation*, w: P.L. Nimis, C. Scheidegger, P.A. Wolseley, *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 2000, s. 327-332.

²⁴ P. Czarnota, *Porosty jako indykatory zanieczyszczenia środowiska. Przegląd metod lichenindykacyjnych*, „Przegląd Przyrodniczy” 1998 nr IX(1/2), s. 55-72.

²⁵ T.M. Traczewska, op. cit.

²⁶ J. Fabiszewski, T. Brej, K. Bielecki, op. cit.; R. Kral, L. Kryzova, J. Liska, *Background concentrations of lead and cadmium in the lichen Hypogymnia physodes at different altitudes*, „Science of the Total Environment” 1989 nr 84, s. 201-209; P. Czarnota, *Zawartość mikro- i makropierwiastków w plechach Hypogymnia physodes w Gorczańskim Parku Narodowym – próba lichenindykacji*, „Parki Narodowe i Rezerваты Przyrody” 1995 nr 14(3), s. 69-88; A. Kepel, op. cit.; A. Kłos, *Porosty bio wskaźniki i biomonitoring zanieczyszczenia środowiska*, „Chemia. Dydaktyka. Ekologia. Metrologia” 2007 nr 12(1-2); A. Matwiejuk, op. cit.

²⁷ A. Kłos, op. cit.

Przykłady wykorzystania porostów jako bioindykatorów do oceny zanieczyszczenia środowiska różnymi polutantami

Wyniki badań lichenoidykacyjnych w Polsce wykorzystujące porosty jako czułe bioindykatory zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego

W Polsce, głównie w miastach najczęściej stosowaną metodą lichenoidykacyjną była skala porostowa służąca do oceny stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego SO₂. Skala porostowa umożliwia określenie strefy porostowej (strefy lichenoidykacyjnej), to znaczy obszaru charakteryzującego się występowaniem wskaźnikowych gatunków porostów nadrzewnych o znanej odporności na stężenie SO₂²⁸. W wielu miastach Polski stwierdzono wyraźne strefowe rozmieszczenie porostów. Pustynie bezporostowe (strefy najbardziej skażone) wyodrębniono w Krakowie²⁹, Toruniu³⁰, Radomiu³¹, Warszawie³², Łodzi³³, Szczecinie³⁴, miastach aglomeracji Trójmiasta³⁵ i Poznaniu³⁶. Strefy bezporostowej nie stwierdzili K. Toborowicz³⁷ w Kielcach, L. Lipnicki³⁸ w Drezdenku oraz J. Kiszka³⁹ w Przemyślu. W Białymstoku pustynia bezporostowa występuje tylko na pojedynczych stanowiskach położonych w centrum miasta⁴⁰.

²⁸ A. Matwiejuk, op. cit.; J. Kiszka, *Wpływ emisji miejskich i przemysłowych na florę porostów (Lichenes) Krakowa i Puszczy Niepołomickiej*, Wyd. Naukowe WSP, Kraków 1977, s. 5-137; J. Kiszka, R. Kościelniak, *Porosty miasta Krakowa oraz waloryzacja ich warunków bioekologicznych*, „Studia Ośrodka Dokumentacji Fizjograficznej” 1996 nr 24, s. 21-72.

²⁹ J. Zurzycki, *Badania nad nadrzewnymi porostami Krakowa i okolicy*, „Materiały do Fizjografii Kraju” 1950 nr 24, s. 1-30.

³⁰ J. Wilkoń-Michalska, N. Głazik, A. Kalińska, *Porosty miasta Torunia*, „Acta Societatis Nicolai Copernici” 1968 nr 29(63), s. 210-253.

³¹ S. Cieśliński, *Flora epifityczna porostów miasta Radom*, „Biuletyn Kwartalny Radomskiego Towarzystwa Naukowego” 1974 nr 11(3/4), s. 169-189.

³² H. Zimny, K. Kucińska, *Porosty Warszawy jako biowskaźniki zburzeń środowiska miejskiego*, „Przegląd Informacyjny – Zieleń Miejska” 1974 nr 10/1, s. 13-22.

³³ S. Kuziel, B. Halicz, *Występowanie porostów epifitycznych na obszarze Łodzi*, „Sprawozdania z Czynności i Posiedzeń Naukowych Łódzkiego Towarzystwa Naukowego” 1979 nr 33(3), s. 1-7.

³⁴ B. Marska, *Z badań nad porostami miasta Szczecina*, „Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Szczecinie, nr 77, Rolnictwo” 1979 nr 22, s. 205-215.

³⁵ W. Fałtynowicz, I. Izydorek, E. Budzbon, *The lichen flora as bioindicator of air pollution of Gdańsk, Sopot and Gdynia*, „Monographiae Botanicae” 1991 nr 73, s. 1-52.

³⁶ A. Kepel, op. cit.

³⁷ K. Toborowicz, *Porosty miasta Kielc i najbliższej okolicy*, „Fragmenta Floristica et Geobotanica” 1976 nr 22(4), s. 574-603.

³⁸ L. Lipnicki, *Porosty miasta Drezdenka i najbliższej okolicy*, „Fragmenta Floristica et Geobotanica” 1984 nr 28(2), s. 221-239.

³⁹ J. Kiszka, *Porosty (Lichenes) oraz warunki bioekologiczne Przemyśla*, „Arboretum Boleszyszyce” 1999 z. 6.

⁴⁰ A. Matwiejuk, op. cit.

Zurzycki⁴¹ opracował pierwszą w Polsce mapę lichenoindykacyjną dla miasta Krakowa i okolicy. Wyzaczył trzy strefy: bezporostową, walki oraz normalnej roślinności. W 1977 roku opublikowano nową mapę rozmieszczenia stref bioekologicznych na podstawie bioty porostów z obrębu Krakowa i Puszczy Niepołomickiej⁴². Wydzielono tam sześć stref (od I do V stref), z kilkoma podstrefami. Stwierdzono rozszerzanie się stref bezporostowych i potwierdzono, że głównymi czynnikami eliminującymi porosty z Krakowa są emisje miejskie i przemysłowe. W Toruniu⁴³ granice strefy walki przebiegały niesymetrycznie w stosunku do centrum miasta. Zimny i Kucińska⁴⁴ wykazali, że na terenie Warszawy rozmieszczenie porostów nie jest równomierne. Mapy rozmieszczenia porostów w stolicy korelowały z mapami zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego. Fałtynowicz i inni⁴⁵ w miastach aglomeracji Trójmiasta wyróżnili cztery strefy lichenoindykacyjne: bezwzględną pustynię bezporostową, względną pustynię porostową, strefę walki oraz strefę normalnej roślinności. Gdańsk, Sopot i Gdynię wyróżnia specyficzny, pasmowy układ stref występowania porostów, równoległy do brzegu Zatoki Gdańskiej. Kepel⁴⁶ opracował skalę lichenoindykacyjną dla Poznania, z uwzględnieniem gatunków zasiedlających podłoże nieorganiczne (betonowe słupy) i umieścił je jako gatunki wskaźnikowe w poszczególnych strefach lichenoindykacyjnych. Stwierdził, że brak porostów nadrzewnych w mieście nie musi być spowodowane zbyt dużym zanieczyszczeniem powietrza a brakiem forofitów lub zbyt młodym wiekiem drzew.

Analiza żywotności (kondycji) plech *Hypogymnia physodes* mierzona aktywnością życiową fotobionta *Trebouxia* jest powszechnie uważana za miernik stężenia dwutlenku siarki w powietrzu⁴⁷. Pustelniak⁴⁸ w Rzeszowie wykazała, że tempo obumierania plech pustułki pęcherzykowatej było większe zimą niż latem. Bystrek i Wójciak⁴⁹, eksponując plechy *Hypogymnia physodes* w wielu punktach Lublina, stwierdzili całkowite obumarcie i rozpad komórek nie tylko zielonego komponenta, ale i strzępek tworzącego plechę porostu grzyba. Matwiejuk⁵⁰ na terenie Białegostoku zaobserwowała najgorszą kondycję plech *Hypogymnia physodes* na stanowiskach eksponowanych na obszarze od centrum miasta

⁴¹ J. Zurzycki, *Badania nad nadrzewnymi porostami Krakowa i okolicy*, „Materiały do Fizjografii Kraju” 1950 nr 24, s. 1-30.

⁴² J. Kiszka, op. cit., s. 5-137.

⁴³ J. Wilkoń-Michalska, N. Głazik, A. Kalińska, *Porosty miasta Torunia*, „Acta Societatis Nicolai Copernici” 1968 nr 29(63), s. 210-253.

⁴⁴ H. Zimny, K. Kucińska, op. cit. s. 13-22.

⁴⁵ W. Fałtynowicz, I. Izydorek, E. Budzbon, op. cit., s. 1-52.

⁴⁶ A. Kepel, op. cit.

⁴⁷ J. Bystrek, *Podstawy lichenologii*, Wyd. Uniwersytetu M. Curie-Skłodowskiej, Lublin 1997, s. 254-263.

⁴⁸ L. Pustelniak, *Epiphytic lichens of the city Rzeszów (South-Eastern Poland)*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prace Botaniczne” 1991 nr 22, s. 171-191.

⁴⁹ J. Bystrek, H. Wójciak, *Mapa bioindykacyjna miasta Lublina oparta o porosty (raport – cz. I)*, Lublin 1994, s. 1-18.

⁵⁰ A. Matwiejuk, op. cit.

ku południowemu wschodowi i północnemu zachodowi, co jest związane z kierunkiem najczęściej wiejących wiatrów (z kierunków zachodnich).

Badania akumulacji metali w plechach transplantowanej pustułki pęcherzykowej potwierdzają, że otrzymane wyniki dotyczą dokładnie tego czynnika, o którym w eksperymencie chodziło. W miastach, w których prowadzono te badania wykazano, że największe stężenia akumulowanych metali są notowane w plechach eksponowanych na stanowiskach, których rozmieszczenie pokrywa się z lokalizacją obszarów o największej immisji⁵¹.

Wyniki badań lichenoidykacyjnych w Europie i na świecie wykorzystujące porosty jako czułe bioindykatory zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego

W wielu krajach Europy i świata prowadzone są badania lichenoidykacyjne, mające na celu ocenę zanieczyszczenia badanych obszarów, ocenę pochodzenia zanieczyszczeń, czy ocenę kierunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z jednostkowych emitorów⁵².

Ocena zanieczyszczenia badanych obszarów

Przykładem prowadzenia kompleksowych badań dotyczących lichenomonitoringu środowiska jest obszar Portugalii. Program oceny zanieczyszczenia środowiska na podstawie analizy stężeń pierwiastków śladowych (Na, Cl, Cu, La, As, V, Mn i Al) w porostach został wdrożony na początku 1990 roku⁵³. Badania prowadzono na transplantowanych porostach *Parmelia sulcata* zbieranych z drzew oliwnych *Olea europaea*.

⁵¹ Ibidem; A. Kepel, op. cit.

⁵² A. Kłos, op. cit.

⁵³ A.M.G. Pacheco, M.C. Freitas, L.I.C. Barros, R. Figueira. *Investigating tree bark as an air-pollution biomonitor by means of neutron activation analysis*, "Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry" 2001 nr 247(2), s. 327-331; A.M.G. Pacheco, M.C. Freitas, *Are lower epiphytes really that better than higher plants for indicating airborne contaminates? An insight into the elemental contents of lichen thalli and tree bark by INAA*, "Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry" 2004 nr 259(1), s. 27-33.

Monitorowano również teren Izraela⁵⁴, obszar Tel Awiwu⁵⁵, środowisko Włoch⁵⁶, Sycylii w okolicach wulkanu Etna⁵⁷, Turcji w okolicach Izmiru⁵⁸, Singapuru⁵⁹, Hiszpanii w okolicach Walencji⁶⁰. Do badań wykorzystano różne gatunki porostów, w tym epifityczne jak *Hypogymnia physodes*, *Xanthoria parietina* oraz epilityczne, jak *Candelariella* sp., *Caloplaca* sp.

Porosty uznaje się za doskonałe wskaźniki zanieczyszczenia powietrza nie tylko metalami ciężkimi (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr), SO₂, ale również związkami azotu (NO_x), ozonu i fluorowodorem (HF)⁶¹.

Ocena pochodzenia zanieczyszczeń

Drugim kierunkiem badawczym realizowanym w ramach lichenomonitoringu jest ocena pochodzenia zanieczyszczeń na podstawie składu chemicznego porostów⁶².

Ważnym źródłem informacji dotyczącym pochodzenia zanieczyszczeń jest skład izotopowy ołowiu Pb i siarki S zawartych w aerozolu atmosferycznym. Stosunek stężeń pary izotopów danego pierwiastka A : $x+nA/nA$ w badanych próbkach jest często porównywany ze stosunkiem stężeń tych izotopów w substancji wzorcowej i wyrażany w promilach. Analizę składu izotopów siarki związanych w porostach wykorzystano do oceny pochodzenia zanieczyszczeń w Kanadzie na wyspie Nowa Fundlandia⁶³. Do badań wykorzystano powszechnie występujące na tym obszarze krzaczkowate porosty *Alectoria sarmentosa*.

⁵⁴ J. Garty, *Comparisons between the metal content of a transplanted lichen before and after the start-up of a coal-fired power station in Israel*, "Canadian Journal of Botany" 1988 nr 66(4), s. 668-671.

⁵⁵ Ibidem.

⁵⁶ D. Varrica, A. Aiuppa, G. Dongarra, *Volcanic and anthropogenic contribution to heavy metal content in lichens from Mt. Etna and Vulcano Island (Sicily)*, "Environmental Pollution" 2000 nr 108, s. 153-162.

⁵⁷ M.F. Grasso, R. Clocchiatti, C. Deschamps, F. Vurro, *Lichens as bioindicators in volcanic areas: Mt. Etna and Vulcano Island (Italy)*, "Environmental Geology" 1999 nr 37(3), s. 207-217.

⁵⁸ S.G. Tuncel, S. Yenisooy-Karakas, *Elemental concentration in lichen in Western Anatolia*, "Water Air Soil Pollutions" 2003 nr 3, s. 97-107.

⁵⁹ O.-H. NG, B.C. Tan, J.P. Obbard, *Lichens as bioindicators of atmospheric heavy metal pollution in Singapore*, "Environmental monitoring and Assessment" 2005 nr 123, s. 63-74.

⁶⁰ P. Bosch-Roig, D. Barca, G.M. Crisci, C. Lalli, *Lichens as bioindicators of atmospheric heavy metal deposition in Valencia, Spain*, "Journal of Atmospheric Chemistry" 2013, s. 10874-10913.

⁶¹ A. Kłos, op. cit.

⁶² Ibidem.

⁶³ R.D. Wiseman, M.A. Wadleigh, *Lichen response to changes atmospheric sulphur: isotopic evidence*, "Environmental Pollution" 2002 nr 116, s. 235-241; M.A. Wadleigh, *Lichens and atmospheric sulphur: what stableisotopes reveal*, "Environmental Pollution" 2003 nr 126, s. 345-351.

Ocena kierunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z jednostkowych emitorów

Na podstawie analizy składu plech porostów dokonywana jest ocena wpływu jednostkowych emitorów, na przykład cementowni, hut i zakładów przemysłowych na środowisko przyrodnicze⁶⁴.

W Portugalii prowadzono badania wpływu lokalnych emitorów na epifityczne porosty *Ramalina fastigiata*⁶⁵. Badano zmiany stężenia miedzi Cu w porostach w zależności od odległości od kopalni miedzi Neves-Corvo. Stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem się odległości od źródła emisji stężenie miedzi w porostach było mniejsze. Zauważono, że badany gatunek porostów pojawia się na tych terenach dopiero w odległości około 500 m od kopalni.

Porosty wykorzystano również jako czułe wskaźniki kumulacji pierwiastków radioaktywnych. Na terenie Czarnobyla i wschodniego Uralu Biazrov⁶⁶ badał koncentrację radionuklidów w plechach porostów. Stwierdził wysoki poziom koncentracji izotopu cezu 137-Cs, stanowiącego produkt rozszczepienia i tym samym występujący w opadzie radioaktywnym (w plechach *Hypogymnia physodes* koncentracja radionuklidu wynosiła 5840 Bq.g⁻¹ w odległości 1,5 km od elektrowni w Czarnobylu, w plechach *Parmelia sulcata* – 14600 Bq.g⁻¹, w plechach *Cladonia mitis* – 2700 Bq.g⁻¹).

Porosty jako wskaźniki naturalności

Od kilkunastu lat zwraca się uwagę na rolę porostów jako wskaźników naturalności wręcz pierwotności obszarów leśnych. Tworzy się w tym celu listy gatunków porostów określających stopień antropogenicznego przekształcenia się lasów zarówno w Polsce⁶⁷, jak i w Europie⁶⁸. Skale te umożliwiają, w zależności od koncepcyjnego podejścia i celu zastosowania, dokonanie oceny stopnia naturalności danego kompleksu leśnego (jego ciągłości ekologicznej) lub stopnia jego degeneracji⁶⁹. Wysoką wartość porostów jako uniwersalnych wskaźników jakości (bioróżnorodności) środowiska przyrodniczego w lasach potwierdzają badania wskazujące na wyraźną korelację pomiędzy wzrostem zróżnicowania gatun-

⁶⁴ A. Kłos, op. cit.

⁶⁵ C. Branquinho i in., *Improving the use of lichens as biomonitors of atmospheric metal pollution*, "Science of the Total Environment" 1999 nr 232, s. 67-77.

⁶⁶ L.G. Biazrov, *The Radionuclides in Lichen Thalli in Chernobyl and East Urals Areas afters Nuclear Accidents*, "Phyton" 1994 nr 34(1), s. 85-94.

⁶⁷ S. Cieśliński, *Atlas rozmieszczenia porostów (Lichenes) w Polsce Północno-Wschodniej*. Phytocoenosis (N.S.) 15, Suppl. Cartogr. Geobot., 2003, s. 60-66.

⁶⁸ A.M. Coppins, B.J. Coppins, *Indices of Ecological Continuity for Woodland Epiphytic Lichen Habitats in the British Isles*. British Lichen Society, London 2002, s. 11-37.

⁶⁹ B. Nordén, T. Appelqvist, *Conceptual problems of Ecological Continuity and ist bioindicators*, "Biodiversity and Conservation" 2001 nr 10, s. 779-791.

kowego porostów i związanych z nimi, w różny sposób, innymi grupami organizmów⁷⁰.

Swoistą skalę biologiczną, pozwalającą określić stopień naturalności danego zbiorowiska leśnego, zaproponował S. Cieśliński⁷¹. Skala ta powstała na podstawie wieloletnich badań nad porostami Polski północno-wschodniej. Ta stosunkowo obszerna lista zawiera 141 gatunków występujących w zbiorowiskach leśnych północno-wschodniej części kraju, ale spotykanych także w innych rejonach Polski i Europy. Skala ta składa się z 5 grup gatunków, odpowiadających różnym stopniom antropogenicznych przekształceń zbiorowisk leśnych: porosty lasów pierwotnego pochodzenia (I), porosty lasów naturalnych (II), porosty regenerujących się lasów gospodarczych (III), porosty w lasach gospodarczych (IV), porosty w zdegenerowanych lasach (V). Dwu pierwszym kategoriom nadano status obligatoryjnych lub fakultatywnych reliktyw puszczańskich⁷².

Porosty jako wskaźniki niżowych lasów puszczańskich

Pośród 1554 występujących w Polsce gatunków porostów⁷³, około 160, obligatoryjnych lub fakultatywnych epifitów i epiksyli, uznaje się za taksony związane z różnymi typami starych lasów naturalnych i zregenerowanych lasów gospodarczych. Pośród tej grupy, 71 gatunków spełnia kryteria przypisywane wskaźnikom niżowych lasów puszczańskich:

- są gatunkami rodzimymi występującymi wyłącznie w naturalnych zbiorowiskach leśnych;
- są stałymi, naturalnymi składnikami biocenoz leśnych, a ich właściwości biologiczno-ekologiczne są dostosowane do fitoklimatu i środowiska leśnego;
- są szczególnie czułe na zmiany warunków siedliskowych, zwłaszcza wilgotności względnej powietrza;
- są typowymi epifitami i epiksylami zasiedlającymi specyficzne siedliska leśne, na przykład bardzo stare i żywe drzewa, martwe drewno w różnej formie i w różnym stopniu rozkładu;
- są gatunkami stenotopowymi o ściśle określonej amplitudzie ekologicznej, nie rosną w lasach gospodarczych;
- nie wykazują tendencji do opanowywania siedlisk antropogenicznych.

Obecność takich gatunków wskaźnikowych daje podstawę do oznaczenia stopnia naturalności fitocenoz leśnych. W warunkach klimatycznych Polski Niżo-

⁷⁰ H. Uliczka, P. Angelstam, *Assessing conservation values of forest stands based on specialized lichens and birds*, "Biological Conservation" 2000 nr 95, s. 343–351; B. Gunnarsson, M. Hake, S.A. Hultengren, *Functional relationship between species richness of spiders and lichens in spruce*, "Biodiversity and Conservation" 2004 nr 13, s. 685–693.

⁷¹ S. Cieśliński, op. cit., s. 62–64.

⁷² S. Cieśliński i in., *Relicts of the primeval (virgin) forest. Relict phenomena*, w: *Cryptogamous plants in the forest communities of Białowieża National Park* (Project CRYPTO 3). Phytocoenosis 8 (N.S.), red. J. B. Faliński, W. Mułenko, "Archivum Geobotanicum" 1996 nr 6, s. 197–216.

⁷³ W. Fałtynowicz, *The lichens lichenicolous and allied fungi of Poland. An annotated checklist. Krytyczna lista porostów i grzybów naporostowych Polski*, Polish Academy of Science, Kraków 2003.

wej dominują siedliska lasów liściastych, w tym strefowych grądów, buczyn i dąbrów, dlatego wśród wskaźników najliczniejszą grupę stanowią porosty ściśle związane z lasami liściastymi⁷⁴.

Porosty jako wskaźniki zmian klimatu

W ostatnich latach pojawiły się liczne prace na temat porostów i ich reakcji na zmiany klimatu w Europie⁷⁵. Zaobserwowano, że wskutek globalnego ocieplenia klimatu zwiększa się udział gatunków epifitycznych, a zmniejsza się udział gatunków naziemnych. Zmiany te są znacznie szybsze w miejscach o dużym stopniu zanieczyszczenia, na terenach zabudowanych oraz na otwartych terenach wiejskich niż na obszarach leśnych. Stwierdzono, że zwiększa się wyraźnie udział gatunków porostów z fotobiontem *Trentepohlia* (na przykład *Arthonia radiata*, *Dimerella pineti*, *Enterographa crassa*, *Graphis scripta*, *Opegrapha sp.*, *Porina aenea*, *Schismatomma decolorans*).

Uzyskane dane z badań poddawane są analizie statystycznej w celu scharakteryzowania wystąpienia, różnorodności biologicznej i pokrycia porostów na miejscu.

Stosuje się wskaźnik tendencji wykrywania (TDI), który jest liniową zależnością liczby gatunków, pokrycia gatunków z wybranym współczynnikiem w celu zapewnienia maksymalnej zdolności do wykrywania globalnych zmian klimatycznych (zmian w czasie).

$$TDI = w1 \cdot a1 + w2 \cdot a2 + \dots + wK \cdot aK \quad (2)$$

gdzie:

- K – liczba gatunków porostów
- a1 – pokrycie poszczególnych gatunków (1, 2 ...K)
- w2 – wybrane współczynniki (1, 2K)

Insarov i inni⁷⁶ prowadzili monitoring biologiczny w miejscach o przewidywalnych zmianach klimatycznych na świecie w centralnym Highlands Negev, na terenie Izraela. Proponowana metodologia takiego monitoringu składała się z systemu badawczego, w tym pomiaru porostów naskalnych wzdłuż transektów na płaskich skałach wapiennych i budową indeksu wykrywania trendu (TDI). TDI był liniową zależnością sumy gatunków porostów z oszacowanym pokryciem z wybranymi współczynnikami (na przykład wysokością nad poziomem

⁷⁴ K. Czyżewska, S. Cieśliński, *Porosty – wskaźniki nizinnych lasów puszczańskich w Polsce*, „Monographiae Botanicae” 2003 nr 91, s. 223–239.

⁷⁵ G.E. Insarov i in., *A system to monitor climate change with epilithic lichens*, „Environmental Monitoring and Assessment” 1999 nr 55, s. 279–298; A. Aptroot, C.M. van Herk, *Further evidence of the effects of global warming on lichens, particularly those with Trentepohlia photobionts*, „Environmental Pollution” 2007 nr 146, s. 293–298; P.E. Giordani, G. Incerti, *The influence of climate on the distribution of lichens: a case study in a borderline area (Liguria, NW Italy)*, „Plant Ecology” 2008 nr 195, s. 257–272.

⁷⁶ G.E. Insarov i in., op. cit., s. 279–298.

morza), w celu zapewnienia maksymalnej zdolności do wykrywania globalnych trendów klimatycznych. Współczynniki zostały oszacowane w badaniu porostów wzdłuż gradientu wysokościowym od 500 do 1000 m n.p.m.

Podsumowanie

Porosty uznawane są za klasyczny przykład biologicznego wskaźnika zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Duża ich wrażliwość na zanieczyszczenia powodowana jest biologią tych organizmów i ich warunkami życia. Organizmy te korzystają z występujących w powietrzu związków mineralnych i organicznych źródeł azotu. Wodę pobierają również z atmosfery, głównie w postaci gazowej. Związanie swego bytu z atmosferą jest przyczyną, że porosty znalazły się w grupie organizmów najbardziej wrażliwych na zanieczyszczenia powietrza i powszechnie traktowane są jako najczulsze biotesty w monitoringu biologicznym, rejestrujące skażenia dwutlenkiem siarki, tlenkami azotu, a także metalami ciężkimi, radioaktywnymi izotopami. Wrażliwość porostów na zanieczyszczenia atmosfery została jednoznacznie udokumentowana doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych i poparta badaniami terenowymi. Opracowano różnorodną tematykę i metody badawcze.