

ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA STACJI BAZOWYCH ZMŚP W 2011 ROKU NA PODSTAWIE KONCENTRACJI METALI CIĘŻKICH I SIARKI W PLECHACH POROSTU *HYPGYMNINGIA PHYSODES* ZEBRANYCH Z NATURALNEGO ŚRODOWISKA

Katarzyna Sawicka-Kapusta, Marta Zakrzewska, Paweł Dudzik, Karolina Gołuszka

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Dudzik P., Gołuszka K., 2014: Zanieczyszczenia powietrza Stacji Bazowych ZMŚP w 2011 roku na podstawie koncentracji metali ciężkich i siarki w plechach porostu *Hypogymnia physodes* zebranych z naturalnego środowiska (*Air pollution of the base stations of the Integrated Monitoring of Natural Environment in 2011 on the basis of heavy metals and sulphur concentration in lichen Hypogymnia physodes collected from natural environment*), Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Vol. 16, s. 49–57.

Zarys treści: W lipcu 2011 roku, na terenie ośmiu Stacji Bazowych ZMŚP (Biała Góra, Storkowo, Puszcza Borecka, Wigry, Kampinos, Św. Krzyż, Roztocze i Szymbark) zebrano próby porostu *Hypogymnia physodes* występujące w naturalnym środowisku, na stanowiskach wyznaczonych w 2001 r. W plechach analizowano poziom metali ciężkich (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Ni i Cr) metodą absorpcji atomowej AAS i koncentrację S metodą turbidymetryczną. Stacje Bazowe ZMŚP w 2011 r. charakteryzowały się zróżnicowanym zanieczyszczeniem powietrza zarówno metalami ciężkimi, jak dwutlenkiem siarki. Najwyższe, statystycznie nieróżniące się od siebie poziomy kadmu wykazano na Stacjach Św. Krzyż, Roztocze, Kampinos i Szymbark, najniższe w Storkowie i Białej Górze. Najwyższe koncentracje ołowiu stwierdzono na Stacji Św. Krzyż, o połowę niższe w Szymbarku, na Roztoczu i w Białej Górze. Najniższe zanieczyszczenie powietrza tym metalem wykazano w Storkowie i na Wigrach. Zanieczyszczenie miedzią było podobne na wszystkich Stacjach Bazowych ZMŚP. Największe zanieczyszczenie powietrza cynkiem, różniące się istotnie od pozostałych, wykazano na Stacji Bazowej Św. Krzyż, natomiast najmniejsze w Białej Górze. Na pozostałych Stacjach Bazowych poziom cynku był wyrównany. Najwięcej żelaza w plechach porostów stwierdzono w Szymbarku i na Św. Krzyżu, najmniej w Storkowie, Puszczy Boreckiej i na Wigrach. Najwyższe koncentracje chromu wykazano na trzech Stacjach Bazowych: w Szymbarku, na Św. Krzyżu i Białej Górze, a niklu na dwóch: w Kampinosie i Białej Górze. Na pozostałych Stacjach poziomy obydwu metali były podobne. Generalnie, na północy kraju stwierdzono niższe koncentracje kadmu, ołowiu, cynku i żelaza aniżeli na południu. Najniższe zanieczyszczenie powietrza dwutlenkiem siarki wykazano w 2011 r. na Roztoczu, Św. Krzyżu i na Wigrach, natomiast najwyższe w Szymbarku i w Białej Górze.

W Puszczy Boreckiej, Storkowie i Kampinosie zanieczyszczenie dwutlenkiem siarki było podobne. Na przestrzeni jedenastu lat (2001–2011) nastąpiła pewna, niewielka, poprawa jakości powietrza na Stacjach Bazowych ZMŚP. W 2011 r. w stosunku do roku 2001 zmniejszyło się istotnie statystycznie zanieczyszczenie powietrza ołowiem w Kampinosie, Storkowie, Puszczy Boreckiej i Wigrach, natomiast w Szymbarku i na Św. Krzyżu nie zmieniło się. Na wszystkich Stacjach Bazowych, z wyjątkiem Puszczy Boreckiej, zmniejszyło się zanieczyszczenie miedzią. Niższą statystycznie koncentrację żelaza zarejestrowano w Storkowie i na Wigrach. Nie zmieniło się zanieczyszczenie powietrza kadmem i cynkiem. Istotnie wzrosło zanieczyszczenie powietrza dwutlenkiem siarki w Szymbarku, zmniejszyło się na Św. Krzyżu, natomiast na pozostałych Stacjach Bazowych nie zmieniło się.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, metale ciężkie, SO₂, *Hypogymnia physodes*, Stacje Bazowe ZMŚP.
Key words: air pollution, heavy metals, SO₂, *Hypogymnia physodes*, Base Stations INME.

Katarzyna Sawicka-Kapusta, Marta Zakrzewska, Paweł Dudzik, Karolina Gołuszka, Instytut Nauk o Środowisku UJ, Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, e-mail: katarzyna.sawicka-kapusta@uj.edu.pl

1. Wprowadzenie

Mchy i porosty to bardzo dobre i czułe biowskaźniki zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi, a w przypadku porostów również dwutlenkiem siarki stosowane w biomonitoringu od wczesnych lat 60. ubiegłego wieku (LeBlanc, De Sloover 1970, Ruhling, Tyler 1970, Pilegaard 1979, Burton 1986). Mogą spełniać rolę bioindykatorów także w przypadku innych zanieczyszczeń, jak radionuklidy czy związki organiczne, takie jak WWA (Godzik i in. 2014). Ich przydatność w ocenie zanieczyszczenia powietrza wiąże się przede wszystkim z pobieraniem przez nie substancji potrzebnych do życia wprost z opadów atmosferycznych. Drugą ich cechą jest możliwość akumulacji dużych ilości metali ciężkich, które u większości roślin wyższych powodowałyby znacznie szybciej zaburzenia procesów fizjologicznych i biochemicznych. Kolejną cechą obu tych biowskaźników, niezwykle ważną w bioindykacji, jest powszechność występowania wielu gatunków, co umożliwia ich stosowanie zarówno w skali lokalnej, regionalnej, jak i kontynentalnej (Burton 1986, Puckett 1988, Conti, Cecchetti 2001). Wydaje się, że porosty są bardziej uniwersalnymi bioindykatorami, ponieważ w zależności od zanieczyszczenia mogą być równocześnie akumulatorami i indykatorami, można je zbierać wprost z naturalnego środowiska lub transplantować na obszary, w których nie występują naturalnie (De Wit 1983, Burton 1986, Puckett 1988, Conti, Cecchetti 2001, Kranner i in. 2002, Nash 2008, Kularatne, de Freitas 2013).

Po raz pierwszy ocenę zanieczyszczenia powietrza Stacji Bazowych ZMŚP metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki z wykorzystaniem porostu *Hypogymnia physodes* jako biowskaźnika wykonano w 2001 roku. (Sawicka-Kapusta, Zakrzewska 2003). Kolejne przeprowadzono w 2003, 2005, 2007 i 2009 roku (Sawicka-Kapusta i in. 2005, Sawicka-Kapusta i in. 2007, Sawicka-Kapusta i in. 2008, Sawicka-Kapusta i in. 2010). Porównanie koncentracje metali ciężkich i siarki w plechach porostów w kolejnych okresach dwuletnich pozwala na śledzenie zmian zanieczyszczenia powietrza na obszarach Stacji Bazowych.

Celem pracy była ocena zanieczyszczenia metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki powietrza Stacji Bazowych ZMŚP w 2011 roku, a także prześledzenie fluktuacji tych zanieczyszczeń w okresie jedenastu lat prowadzenia badań.

2. Metody

W lipcu 2011 roku, z obszaru ośmiu Stacji Bazowych zebrano 86 prób porostu *Hypogymnia physodes*

ze stanowisk wyznaczonych w 2001 roku. Ilość prób na poszczególnych Stacjach jest zróżnicowana. W Szymbarku i na Św. Krzyżu liczba prób jest niewielka ze względu na brak na ich obszarze stanowisk z naturalnie występującą pustułą pęcherzykowatą na niektórych z nich. Na terenie Stacji Biała Góra zebrano 10 prób, w Storkowie 11, w Puszczy Boreckiej 16, na Wigrach 12, w Kampinosie 10, na Stacji Św. Krzyż 7, w Szymbarku 5 i po raz pierwszy na nowo utworzonej Stacji Bazowej Roztocze 15.

Ocenę zanieczyszczenia powietrza Stacji Bazowych wykonano na podstawie koncentracji metali ciężkich (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Ni, Cr) i siarki w plechach porostu *Hypogymnia physodes*. Oczyszczone z kory i wysuszone w temp. 60°C plechy mineralizowano w mieszaninie spektralnie czystych stężonych kwasów $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ w stosunku 4:1 (Pilegaard 1979, Sawicka-Kapusta, Rakowska 1993). Koncentracje metali ciężkich oznaczane były metodą AAS. Kadm, ołów, miedź, nikiel i chrom w spektrofotometrze PerkinElmer AAnalyst 800 z kuetą grafitową, a cynk i żelazo w spektrofotometrze PerkinElmer AAnalyst 200 z płomieniem gazowym acetylen-powietrze. Analizowano również materiał referencyjny CRM 482. Odzysk wynosił od 94 do 99,9%. Siarkę ogólną oznaczono metodą turbidymetryczną Buttersa-Chenry'ego (Nowosielski 1968, Białońska, Dayan 2005). Wszystkie wyniki podano w $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ suchej masy.

Aby sprawdzić czy istnieją statystycznie istotne różnice w koncentracji pierwiastków pomiędzy Stacjami Bazowymi w 2011 roku i na każdej Stacji pomiędzy poszczególnymi latami zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA i test a posteriori Tukey'a (Łomnicki 2010).

3. Wyniki

Stacje Bazowe ZMŚP w 2011 roku charakteryzowały się zróżnicowanym zanieczyszczeniem powietrza zarówno metalami ciężkimi jak i dwutlenkiem siarki. Najwyższe koncentracje ołowiu w plechach *Hypogymnia physodes* stwierdzono na Stacji Św. Krzyż (18,22 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) o połowę niższe w Szymbarku (9,20 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) i na Roztoczu (9,34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Wartości te nie różniły się statystycznie między sobą. Poziom ołowiu w porostach zebranych w Białej Górze był nieco niższy i wynosił 8,15 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Najniższe zanieczyszczenie powietrza tym metalem wykazano w Storkowie (2,61 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) i na Wigrach (3,73 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Wartości te nie różniły się statystycznie między sobą, natomiast koncentracja ołowiu wykazana w Storkowie była istotnie niż-

Tab. 1. Średnie stężenia (\pm SE, zakres) ołowiu, kadmu i siarki ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) w plechach porostu *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w 2011 roku
 Tab. 1. Average concentrations (\pm SE, range) of lead, cadmium and sulphur in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations of Integrated Nature Monitoring System in 2011

| Stacja Bazowa Base Station | Pb | Cd | S |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Szymbark | 9,20 _{cde} \pm 0,66 | 0,56 _{ab} \pm 0,09 | 2117 _c \pm 200 |
| N = 5 | 7,42–11,41 | 0,21–0,73 | 1605–2523 |
| Św. Krzyż | 18,22 _c \pm 2,86 | 0,69 _b \pm 0,06 | 1046 _{ab} \pm 106 |
| N = 7 | 9,32–32,93 | 0,45–0,96 | 636–1420 |
| Roztocze | 9,34 _{de} \pm 0,92 | 0,60 _b \pm 0,10 | 932 _a \pm 82 |
| N = 15 | 3,73–16,98 | 0,20–1,60 | 517–1425 |
| Kampinos | 5,92 _{bcd} \pm 0,70 | 0,57 _b \pm 0,08 | 1584 _{bc} \pm 244 |
| N = 10 | 1,74–9,91 | 0,21–0,90 | 691–2774 |
| Storkowo | 2,61 _a \pm 0,64 | 0,25 _a \pm 0,03 | 1524 _{bc} \pm 165 |
| N = 11 | 0,97–7,30 | 0,15–0,51 | 730–2081 |
| Biała Góra | 8,15 _{bcd} \pm 1,94 | 0,30 _a \pm 0,08 | 2001 _c \pm 237 |
| N = 10 | 2,90–19,37 | 0,14–0,97 | 1370–3927 |
| Puszcza Borecka | 5,04 _{bc} \pm 0,72 | 0,43 _{ab} \pm 0,06 | 1426 _{bc} \pm 106 |
| N = 16 | 1,60–12,68 | 0,10–0,86 | 606–2377 |
| Wigry | 3,73 _{ab} \pm 0,51 | 0,39 _{ab} \pm 0,03 | 1054 _{ab} \pm 100 |
| N = 12 | 1,93–8,02 | 0,24–0,56 | 458–1701 |

a, b, c, d, e – różnymi literami oznaczono różnice istotne statystycznie w stężeniach pierwiastków pomiędzy Stacjami Bazowymi, $p < 0,05$.

a, b, c, d, e – different letters indicate statistical differences in element concentrations between Base Stations, $p < 0.05$.

sza od wszystkich pozostałych (tab. 1). Koncentracja kadmu w plechach *Hypogymnia physodes* zebranych w 2011 roku wahała się od 0,25 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ na Stacji Bazowej Storkowo do 0,69 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ na Św. Krzyżu. Najwyższe, statystycznie nieróżniące się od siebie poziomy kadmu wykazano na Stacjach Św. Krzyż, Roztocze, Kampinos i Szymbark, a najniższe w Storkowie i Białej Górze

Tab. 2. Średnie stężenia (\pm SE, zakres) żelaza, miedzi i cynku ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) w plechach porostu *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w 2011 roku
 Tab. 2. Average concentrations (\pm SE, range) of iron, copper and zinc in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations of Integrated Nature Monitoring System in 2011

| Stacja Bazowa Base Station | Fe | Cu | Zn |
|-------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------|
| Szymbark | 872 _a \pm 41 | 3,3 \pm 0,4 | 62 _{ab} \pm 6 |
| N = 5 | 742–1000 | 2,1–4,4 | 41–75 |
| Św. Krzyż | 740 _{cd} \pm 71 | 3,1 \pm 0,6 | 112 _c \pm 4 |
| N = 7 | 447–938 | 1,3–6,2 | 94–124 |
| Roztocze | 511 _{cd} \pm 24 | 3,3 \pm 0,2 | 68 _b \pm 4 |
| N = 15 | 332–659 | 1,7–4,8 | 52–92 |
| Kampinos | 539 _{cd} \pm 73 | 2,4 \pm 0,2 | 69 _b \pm 8 |
| N = 10 | 327–954 | 1,6–3,3 | 34–121 |
| Storkowo | 276 _{ab} \pm 14 | 3,2 \pm 0,3 | 50 _{ab} \pm 6 |
| N = 11 | 211–385 | 2,1–5,1 | 26–90 |
| Biała Góra | 486 _{bc} \pm 88 | 3,4 \pm 0,3 | 45 _a \pm 6 |
| N = 10 | 277–1204 | 1,8–4,7 | 22–74 |
| Puszcza Borecka | 295 _a \pm 31 | 3,7 \pm 0,3 | 56 _{ab} \pm 6 |
| N = 16 | 179–610 | 2,0–7,4 | 33–103 |
| Wigry | 343 _{ab} \pm 57 | 3,4 \pm 0,3 | 71 _{bc} \pm 4 |
| N = 12 | 89–634 | 2,2–5,8 | 48–84 |

a, b, c – różnymi literami oznaczono różnice istotne statystycznie w stężeniach metali pomiędzy Stacjami Bazowymi, $p < 0,05$.

a, b, c – different letters indicate statistical differences in metal concentrations between Base Stations, $p < 0.05$.

(tab. 1). Najwięcej żelaza w plechach porostów stwierdzono w Szymbarku (872 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) i na Św. Krzyżu (740 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), najmniej w Storkowie, Puszczy Boreckiej i na Wigrach (od 276 do 343 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Na pozostałych trzech Stacjach wartości były pośrednie (tab. 2). Koncentracja miedzi w plechach *Hypogymnia physodes* była podobna na wszystkich Stacjach Bazowych ZMŚP i wahała się od 2,4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ w Kampinosie do 3,7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ w Puszczy Boreckiej (tab. 2). Największe zanieczyszczenie powietrza cynkiem, różniące się istotnie od pozostałych, wykazano na Stacji Bazowej Św. Krzyż (112 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), natomiast najmniejsze w Białej Górze (45 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Wartości te różniły się statystycznie od siebie. Na pozostałych Stacjach Bazowych poziom cynku

Tab. 3. Średnie stężenia (\pm SE, zakres) niklu i chromu ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) w plechach porostu *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w 2011 roku

Tab. 3. Average concentrations (\pm SE, range) of nickel and chromium in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations of Integrated Nature Monitoring System in 2011

| Stacja Bazowa Base Station | Ni | Cr |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Szymbark | 0,57 _{abcd} \pm 0,06 | 1,87 _c \pm 0,46 |
| N = 5 | 0,40–0,74 | 0,80–3,14 |
| Św. Krzyż | 0,67 _{bcd} \pm 0,08 | 1,31 _{bc} \pm 0,41 |
| N = 7 | 0,52–1,04 | 0,53–3,30 |
| Roztocze | 0,73 _{cd} \pm 0,09 | 0,99 _{bc} \pm 0,19 |
| N = 15 | 0,39–1,62 | 0,50–3,15 |
| Kampinos | 1,06 _d \pm 0,05 | 0,49 _{ab} \pm 0,20 |
| N = 10 | 0,75–1,34 | 0,13–2,14 |
| Storkowo | 0,45 _{ab} \pm 0,12 | 0,37 _a \pm 0,06 |
| N = 11 | 0,07–1,56 | 0,16–0,72 |
| Biała Góra | 1,04 _d \pm 0,11 | 1,51 _{bc} \pm 0,51 |
| N = 10 | 0,60–1,72 | 0,31–5,07 |
| Puszcza Borecka | 0,46 _{abc} \pm 0,05 | 0,49 _{ab} \pm 0,09 |
| N = 16 | 0,18–0,72 | 0,22–1,54 |
| Wigry | 0,33 _a \pm 0,07 | 0,71 _{ab} \pm 0,24 |
| N = 12 | 0,08–1,02 | 0,06–2,82 |

a, b, c, d, e – różnymi literami oznaczono różnice istotne statystycznie w stężeniach metali pomiędzy Stacjami Bazowymi, $p < 0,05$.

a, b, c, d, e – different letters indicate statistical differences in metal concentrations between Base Stations, $p < 0,05$.

był wyrównany i mieścił się w zakresie od $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ w Storkowie do $71 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ na Wigrach (tab. 2). Najwyższe koncentracje chromu wykazano na trzech Stacjach Bazowych: w Szymbarku $1,87 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Białej Górze $1,51 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ i na Św. Krzyżu $1,31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, a niklu na dwóch: Kampinosie $1,06 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ i Białej Górze $1,04 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Na pozostałych Stacjach poziomy obydwu metali były podobne (tab. 3). Najniższą koncentrację siarki w plechach porostów zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w 2011 roku wykazano na Roztoczu ($932 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), Św. Krzyżu ($1046 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) i na Wigrach ($1054 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), natomiast najwyższą w Szymbarku ($2117 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) i w Białej Górze ($2001 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). W Puszczy Boreckiej, Storkowie i Kampinosie zawartość siarki była podobna i wynosiła średnio $1511 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (tab. 1). Ogólnie można podsumować, że w 2011 roku na północy Polski stwierdzono

niższe zanieczyszczenie powietrza kadmem, ołowiem, cynkiem i żelazem aniżeli na południu. Wyjątek stanowi Stacja Bazowa Biała Góra, w której wykazano wyższy poziom ołowiu i Wigry z podwyższoną ilością cynku. Zanieczyszczenie miedzią było niewielkie i podobne na wszystkich Stacjach Bazowych (tab. 1, 2). Nie wykazano zróżnicowania zanieczyszczenia powietrza chromem i niklem w zależności od lokalizacji Stacji Bazowych (tab. 3). W przypadku zanieczyszczenia dwutlenkiem siarki nie stwierdzono w 2011 roku jego zróżnicowania w zależności od lokalizacji Stacji Bazowych, tak jak to wykazano w przypadku metali ciężkich (tab. 1).

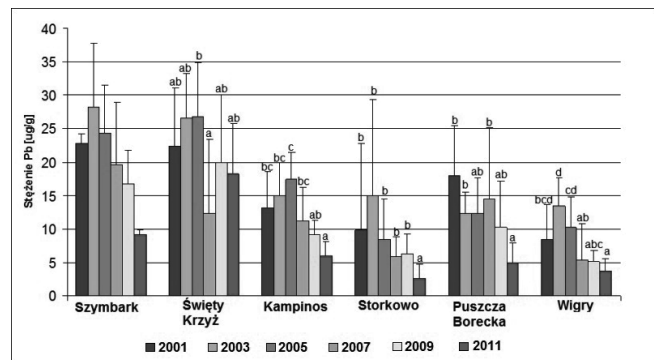
Bory Tucholskie a także obszary leśne położone w północno-wschodniej Polsce są traktowane w badaniach bioindykacyjnych jako teren kontrolny. W 2010 roku oceniono zanieczyszczenie powietrza Parku Narodowego Bory Tucholskie na podstawie koncentracji metali ciężkich i siarki w plechach *Hypogymnia physodes* zebranych z naturalnego środowiska. Średnie koncentracje metali z 20 stanowisk na terenie parku wynosiły: Cd – $0,44 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Pb – $5,43 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Cu – $4,7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Zn – $62 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Fe – $437 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Cr – $1,11 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, Ni – $1,66 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Stężenie siarki było stosunkowo wysokie jak na teren kontrolny i wynosiło $1270 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (Mammak 2011). Porównano otrzymane koncentracje metali ciężkich i siarki w plechach *Hypogymnia physodes* zebranych z terenów Stacji Bazowych w 2011 roku ze stężeniami tych pierwiastków w porostach zebranych z Borów Tucholskich. Na wszystkich Stacjach Bazowych stwierdzono niższe aniżeli w Borach Tucholskich poziomy miedzi i niklu. Tylko dwie Stacje Bazowe: Storkowo i Puszcza Borecka mają niższe poziomy pozostałych pięciu metali ciężkich. Stacja Bazowa Wigry ma niższe koncentracje kadmu, ołowiu, żelaza i chromu, a Biała Góra tylko kadmu i cynku w porównaniu do Borów Tucholskich. Z przedstawionego porównania bardzo jasno wynika, że żadna z badanych Stacji Bazowych ZMŚP nie może otrzymać statusu terenu czystego, a przecież pięć z nich (Biała Góra, Wigry, Kampinos, Roztocze i Św. Krzyż) leży na obszarach Parków Narodowych. Tylko trzy Stacje Bazowe: Roztocze, Św. Krzyż i Wigry charakteryzują się niższą aniżeli w Borach Tucholskich zawartością siarki w plechach porostów. Na pozostałych Stacjach poziomy siarki są znacznie wyższe i świadczą o zanieczyszczeniu obszaru Stacji Bazowych dwutlenkiem siarki.

4. Dyskusja

Zbiór co dwa lata plech porostu *Hypogymnia physodes* na Stacjach Bazowych ZMŚP i oznaczanie

w nich koncentracji metali ciężkich i siarki pozwala na ocenę fluktuacji zanieczyszczenia powietrza w krótkich dwuletnich okresach, jak również wykazanie tendencji zmian zanieczyszczenia powietrza w dłuższym okresie czasu. Ostatnie badania przeprowadzono w 2009 roku (Sawicka-Kapusta i in. 2010). W niniejszej pracy porównano więc najpierw wyniki otrzymane w 2011 roku z uzyskanymi w 2009, a następnie fluktuację zmian zanieczyszczenia powietrza na przestrzeni 11 lat w okresie 2001–2011. Zanieczyszczenie powietrza ołowiem na Stacjach Bazowych ZMŚP w 2011 roku było nieco niższe od wykazanego w 2009 roku, ale tylko dla Storkowa była to różnica statystycznie istotna (ryc. 1). Zanieczyszczenie kadmem było podobnie jak w przypadku ołowiu, niższe aniżeli w 2009 roku, ale różnice te były statystycznie istotne jedynie dla Storkowa i Puszczy Boreckiej (ryc. 2).

Podsumowując, brak statystycznych różnic pozwala stwierdzić, że w przypadku obydwu toksycznych metali na większości Stacji Bazowych ich ilości w powietrzu nie zmieniły. Na wszystkich Stacjach Bazowych, z wyjątkiem Św. Krzyża, gdzie wykazano wzrost ilości Fe, zanieczyszczenie powietrza żelazem w 2011 roku w stosunku do roku 2009 nie zmieniło się (ryc. 3). W 2011 roku w porównaniu do 2009 roku poziom miedzi w powietrzu obniżył się istotnie z wyjątkiem Stacji Św. Krzyż (ryc. 4). Tylko w Storkowie zmniejszyła się istotnie statystycznie zawartość cynku w powietrzu w 2011 roku w stosunku do 2009, na pozostałych Stacjach ilość tego metalu nie zmieniła się (ryc. 5). Zanieczyszczenie powietrza chromem w 2011 roku w stosunku do 2009 roku było istotnie niższe w Kampinosie, Storkowie i w Puszczy Boreckiej natomiast niklem w Storkowie, Puszczy Boreckiej i na Wigrach (ryc. 6, 7). Zanieczyszczenie powietrza dwutlenkiem siarki w 2011 roku w porównaniu do 2009 roku wzrosło istotnie w Puszczy Boreckiej, zmniejszyło się statystycznie na Św. Krzyżu, a na pozostałych czterech stacjach nie zmieniło się (ryc. 8). Ponieważ w ramach realizowanych programów Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego nie ocenia się ilości metali ciężkich w powietrzu i opadach atmosferycznych, metoda bioindykacyjna z zastosowaniem porostu *Hypogymnia physodes* jako bio wskaźnika stanowi jedyną informację o zanieczyszczeniu powietrza Stacji Bazowych. Skonfrontowanie uzyskanych z biomonitoringu danych z informacjami GUS o emisjach metali i SO₂ z zakładów szczególnie uciążliwych dla poszczególnych województw wykazuje brak zgodności (Ochrona Środowiska 2012). Emisje te ulegają różnym procesom chemicznym w powietrzu atmosferycznym.

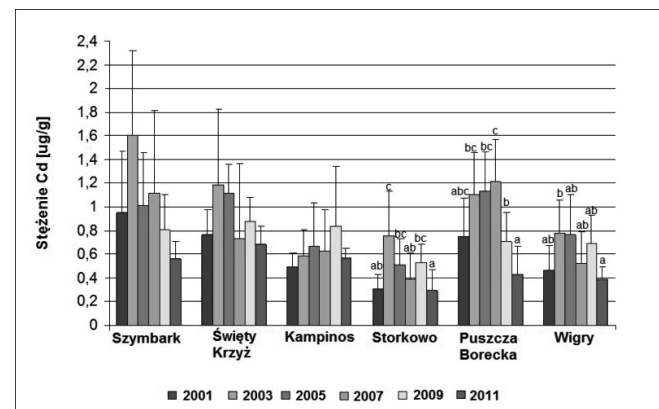


Ryc. 1. Porównanie średniego stężenia ołowiu ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2001–2011

Fig. 1. Comparison of lead concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2001–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$).

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$).

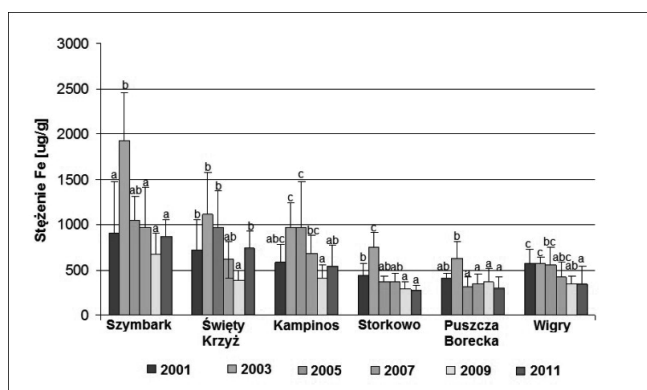


Ryc. 2. Porównanie średniego stężenia kadmu ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2001–2011

Fig. 2. Comparison of cadmium concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2001–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$).

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$).

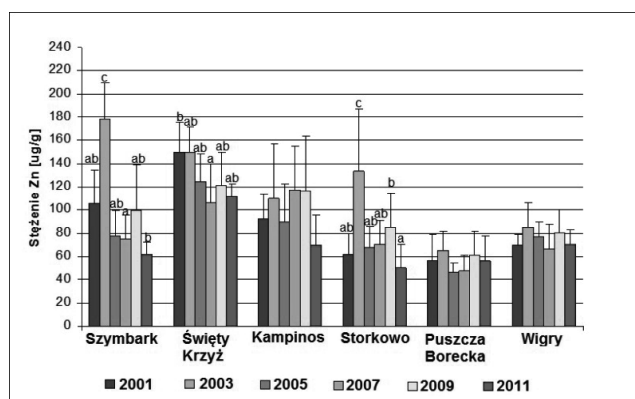


Ryc. 3. Porównanie średniego stężenia żelaza ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2001–2011

Fig. 3. Comparison of iron concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2001–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$)

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$)

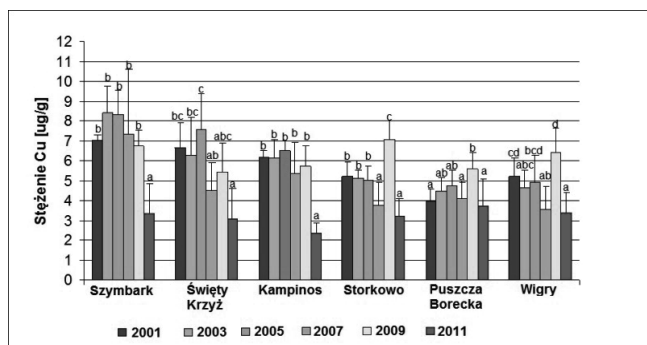


Ryc. 5. Porównanie średniego stężenia cynku ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2001–2011

Fig. 5. Comparison of zinc concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2001–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$)

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$)

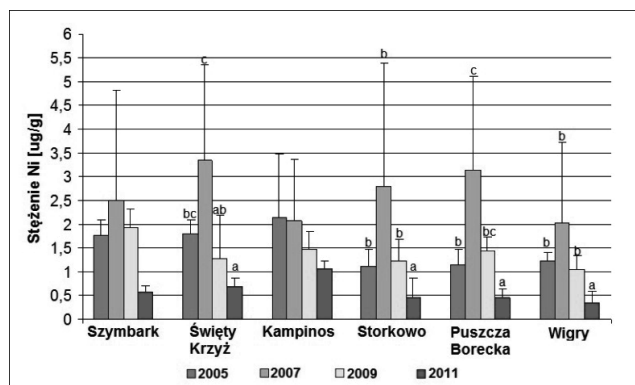


Ryc. 4. Porównanie średniego stężenia miedzi ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2001 – 2011.

Fig. 4. Comparison of copper concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2001–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$)

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$)

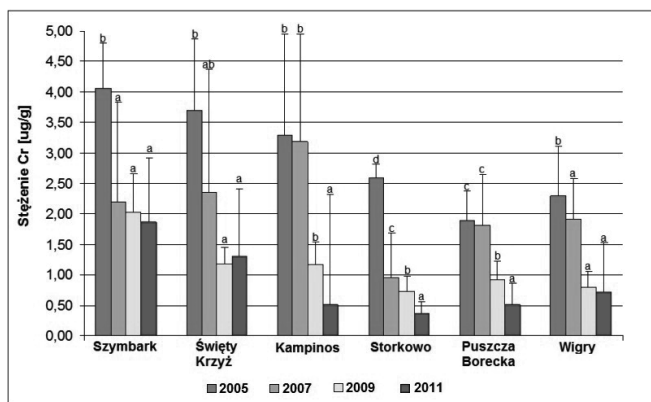


Ryc. 6. Porównanie średniego stężenia niklu ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2005–2011

Fig. 6. Comparison of nickel concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2005–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$)

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$)

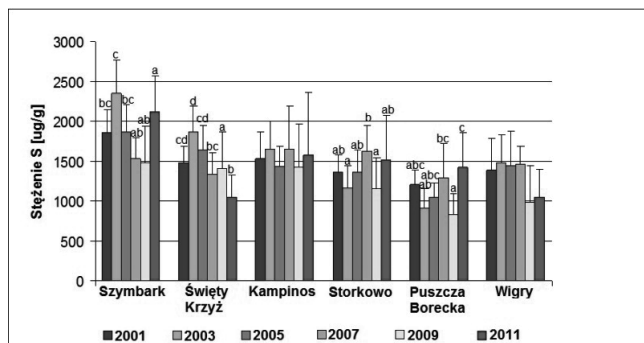


Ryc. 7. Porównanie średniego stężenia chromu ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2005–2011

Fig. 7. Comparison of chromium concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2005–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$)

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$)



Ryc. 8. Porównanie średniego stężenia siarki ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) w plechach porostów *Hypogymnia physodes* zebranych na Stacjach Bazowych ZMŚP w latach 2001–2011

Fig. 8. Comparison of sulphur concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in lichen *Hypogymnia physodes* collected from Base Stations in years 2001–2011

a, b, c – różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie pomiędzy latami w obrębie danej stacji ($p < 0,05$)

a, b, c – different letters indicate statistical differences between years within Base Station ($p < 0.05$)

rycznym, a ich transport zależny jest przede wszystkim od warunków meteorologicznych. Wpływ na zanieczyszczenie powietrza Stacji Bazowych ZMŚP, a więc terenów położonych z dala od dużych miast i ośrodków przemysłowych mają przede wszystkim lokalne źródła zanieczyszczeń: niska emisja z gospodarstw domowych i z małych zakładów przemysłowych, transport drogowy. Oczywiście wpływ ma także transport transgraniczny, szczególnie na terenach przygranicznych, takich jak Puszcza Borecka i Wigry na północy Polski czy Szymbark na południu. W okresie trzech lat (2009–2011) nie nastąpiły duże zmiany w emisji metali ciężkich ani drastyczne obniżenie emisji SO_2 z terenów województw na których położone są Stacje Bazowe ZMŚP (Ochrona Środowiska 2012). Również na terenach Stacji Bazowych, nie wystąpiły istotne zmiany w zanieczyszczeniu powietrza metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki.

Jednak analizując dłuższy okres czasu możemy zauważyć, że na przestrzeni jedenastu lat (2001–2011) nastąpiła pewna, niewielka, poprawa jakości powietrza na Stacjach Bazowych ZMŚP. W 2011 roku w stosunku do roku 2001 zmniejszyło się istotnie statystycznie zanieczyszczenie powietrza ołowiem w Kampinosie, Storkowie, Puszczy Boreckiej i Wigrach, natomiast w Szymbarku i na Św. Krzyżu nie zmieniło się (ryc. 1). Na wszystkich Stacjach Bazowych, z wyjątkiem Puszczy Boreckiej, zmniejszyło się zanieczyszczenie miedzią (ryc. 4). Niższą statystycznie koncentrację żelaza zarejestrowano w Storkowie i na Wigrach (ryc. 3). Nie zmieniło się zanieczyszczenie powietrza Stacji Bazowych kadmem i cynkiem (ryc. 2, 5). Natomiast zdecydowanie w stosunku do 2005 roku (wtedy po raz pierwszy oceniono koncentrację chromu i niklu w porostach) w 2011 roku zmniejszyło się zanieczyszczenie powietrza tymi metalami (ryc. 6, 7). Istotnie wzrosło zanieczyszczenie powietrza dwutlenkiem siarki w Szymbarku, zmniejszyło się na Św. Krzyżu, natomiast na pozostałych Stacjach Bazowych nie zmieniło się (ryc. 8). Całkowita emisja czterech metali ciężkich (Pb, Cd, Zn, Cu) w Polsce w latach 2000–2011 zwiększyła się, natomiast dwóch (Cr i Ni) zmniejszyła się. Emisja cynku zwiększyła się z 1450 do 1510 ton, ołowiu z 530 do 580 ton, miedzi z 326 do 340 ton, a kadmu z 39 do 43 ton. Ilość niklu zmniejszyła się ze 165 do 150 ton a chromu z 48 do 45 ton. Zdecydowanie obniżyła się całkowita emisja dwutlenku siarki z 1511 tys. ton w 2000 roku do 910 tys. ton w 2011 roku. Również zmniejszyła się emisja SO_2 z terenu poszczególnych województw, ale zmiany te nie wykazują jednolitych trendów (Ochrona Środowiska 2012). Przytoczone powyżej dane dotyczące całkowitej emisji

zanieczyszczeń z obszaru Polski w okresie 2000–2011 również potwierdzają wpływ lokalnych źródeł emisji znajdujących się w pobliżu Stacji Bazowych ZMŚP i warunków meteorologicznych na zanieczyszczenie powietrza Stacji. Zastosowana metoda bioindykacyjna wykazała zróżnicowane zanieczyszczenie powietrza badanych Stacji Bazowych ZMŚP zarówno metalami ciężkimi, jak i dwutlenkiem siarki. Powinna być nadal stosowana przynajmniej do momentu kiedy na wszystkich Stacjach będzie prowadzony monitoring aparaturowy zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi tak jak to jest prowadzone na Stacji Puszcza Borecka (Prządka i in. 2012). Należy podkreślić, że chociaż stosowana metoda z wykorzystaniem porostu *Hypogymnia physodes* jest tylko metodą wskaźnikową jednak jest aktualnie powszechnie stosowana na świecie do oceny zanieczyszczenia powietrza (Bajpai i in. 2010, Lodenius i in. 2010, Kularatne, de Freitas 2013).

5. Literatura

- Bajpai R., Upreti D.K., Nayaka S., Kumari B., 2010:** *Biodiversity, bioaccumulation and physiological changes in lichen growing in the vicinity of coal-based thermal power plant of Raebareli district, north India.* J. Hazardous Materials. 174: 429–436.
- Bialońska D., Dayan F.E., 2005:** *Chemistry of the lichen Hypogymnia physodes transplanted to an industrial region.* J. Chem. Ecol. 31: 2975–2991.
- Burton M.A.S., 1986:** *Biological monitoring of environmental contaminants.* MARC Rep. 32, Monitoring and Assessment Research Centre, King's College London, University of London, London.
- Conti M.E., Cecchetti G., 2001:** *Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review.* Environ. Pollut. 114: 471–492.
- De Wit T., 1983:** *Lichens as indicators for air quality.* Environ. Monit. and Assessment. 3: 273–282.
- Godzik B., Szarek-Lukaszewska G., Kapusta P., Stępień K., 2014:** *PAHs concentrations in Poland using moss Pleurozium schreberi as bioindicator.* Polish Bot. J. 59(1): 137–144.
- Kranner I., Beckett R.P., Varma A.K. (eds.), 2002:** *Protocols in lichenology. Culturing, biochemistry, ecophysiology and use in biomonitoring.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Kularatne K.I.A., de Freitas C.R., 2013:** *Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution.* Environ. Exp. Botany, 88: 24–32.
- Le Blanc F., DeSloover J., 1970:** *Relation between industrialization and the distribution and of epiphytic growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal.* Canad. J. Bot. 48: 1485–1496.
- Lodenius M., Kiiskinen J., Tulisalo E., 2010:** *Metak levels of an epiphytic lichen as indicators of air quality in a Finnish suburb.* Boreal Environ Res. 15: 446–452.
- Łomnicki A., 2010:** *Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników.* Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Mammak A., 2011:** *Ocena zanieczyszczenia środowiska Parku Narodowego Bory Tucholskie z zastosowaniem biowskaźników roślinnych i porostów.* Praca magisterska ZMŚ, UJ.
- Nash III T.H. (eds.), 2008:** *Lichen biology.* Cambridge University Press.
- Nowosielski O., 1968:** *Metody oznaczania potrzeb nawożenia.* PWRiL. Warszawa.
- Ochrona Środowiska, 2012: *Informacje i opracowania statystyczne.* GUS. Warszawa.
- Pilegaard K., 1979:** *Heavy metals in bulk precipitation and transplanted Hypogymnia physodes and Dicranoweisia cirrata in the vicinity of a Danish steelworks.* Water, Air and Soil Pollut. 11: 77–91.
- Puckett K.J., 1988:** *Bryophytes and lichens as monitors as metal deposition.* Lichens, Bryophytes and Air Quality. Bibliotheca Lichenologica. 30: 231–267.
- Prządka Z., Degórska A., Skotak K., 2012:** *Zależność pomiędzy stężeniami metali ciężkich i pyłu PM10 a parametrami meteorologicznymi w rejonie Puszczy Boreckiej w latach 2005–2011.* Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 13: 85–92.
- Sawicka-Kapusta K., Rakowska A., 1993:** *Heavy metal contaminations in Polish National Parks.* W: W. Slooff, H. de Kruijf (eds.). Proc. of the Second European Conference on Ecotoxicology, 11–15 May 1992, Amsterdam, The Netherlands. Sci. Total Environ., Supplement 1993. 1: 161–166.
- Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., 2003:** *Ocena zanieczyszczenia powietrza na Stacjach Bazowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w 2001 roku.* W: W. Bochenek, E. Gil (red.). Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych. IOŚ, BMS: 20-29.
- Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Gdula-Argasińska J., Bydłoń G., 2005:** *Ocena zanieczyszczenia powietrza w rejonie Stacji Bazowych ZMŚP na podstawie stężenia metali ciężkich i siarki w plechach porostu Hypogymnia physodes w 2003 roku.* W: A. Kostrzewski i R. Kolander (red.). Zintegro-

wany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropresji. PIOŚ, BMS, Poznań: 73–81.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Bydłoń G., 2007: *Monitoring zanieczyszczenia powietrza Stacji Bazowych ZMŚP metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki w 2005 roku z zastosowaniem porostu Hypogymnia physodes*. W: A. Kostrzewski i A. Andrzejewska (red.). XVII Ogólnopolskie Sympozjum „Program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego a zadania ochrony obszarów Natura 2000”. IOŚ, BMS, Warszawa, 217–226.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Bydłoń G., Pizło A., Marek A., 2008: *Zanieczyszczenie powietrza na terenie Stacji Bazowych ZMŚP w 2007 roku na podstawie koncentracji metali ciężkich i siarki w plechach porostu Hypogymnia physodes*. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Vol. 9: 69–75.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Bydłoń G., Hajduk J., 2010: *Ocena zanieczyszczenia powietrza Stacji Bazowych ZMŚP metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki w latach 2001–2009 z wykorzystaniem porostu Hypogymnia physodes*. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Vol. 11: 63–71.

AIR POLLUTION OF THE BASE STATIONS
OF THE INTEGRATED MONITORING
OF NATURAL ENVIRONMENT IN 2011
ON THE BASIS OF HEAVY METALS
AND SULPHUR CONCENTRATION IN LICHEN
HYPOGYMNINGIA PHYSODES COLLECTED
FROM NATURAL ENVIRONMENT

Summary

In July 2011 at 8 Base Stations (Biała Góra, Storkowo, Puszcza Borecka, Wigry, Kampinos, Św. Krzyż, Roztocze, Szymbark) samples of lichen *Hypogymnia physodes* collected. They originated from natural condition environment, namely stations which were set up in 2001. After collection the lichen samples were analyzed for concentrations of heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Ni, Cr) and sulphur. The first with using AAS and in the latter turbidimetric method. The air pollution (both of SO₂ and heavy metals) of following Base Stations was varied and differed significantly among each other. The highest and most evident pollution was assessed for cadmium, particularly at 4 stations: Św. Krzyż, Roztocze, Kampinos and Szymbark, whereas the lowest was

determined at Storkowo and Biała Góra. No statistical differences between those 4 stations were found. The highest lead concentration was found at Św. Krzyż Base Station, whereas half of this value was noticed in Szymbark, Roztocze and Biała Góra. The lowest air contamination by this metal was found in Storkowo and Wigry. What is interesting, air pollution by copper did not show such a variation among the stations, achieving similar concentration at all investigated Base Stations. Statistically highest comparing to contamination of other stations, was found for zinc at Św. Krzyż while the lowest at Biała Góra Base Station. Zinc pollution for other stations was moderate and rather stable. The high amount of iron in lichens was found in Szymbark and Św. Krzyż, the lowest in Storkowo, Puszcza Borecka and Wigry. The highest chromium concentration was determined in Szymbark, Św. Krzyż and Biała Góra while the highest nickel concentration in Kampinos and Biała Góra. The rest of the stations was characterized by rather a moderate concentration both chromium and nickel. In general, the lower cadmium, lead, zinc and iron concentrations were found in the northern than in southern part of Poland. The lowest air pollution by SO₂ in 2011 was found in Roztocze, Św. Krzyż and Wigry while the highest in Szymbark and Biała Góra. In Puszcza Borecka, Storkowo and Kampinos air pollution by sulphur dioxide was similar. During a period of eleven years (2001–2011) state of air at investigated Base Stations has been slightly improved. In 2011 comparing to year of 2001 air pollution by lead has significantly improved at Kampinos, Storkowo, Puszcza Borecka and Wigry whereas in Szymbark and Św. Krzyż has not practically changed. At all Base Stations air pollution by copper lowered. At the same time statistically lower concentration of iron was noticed at Storkowo and Wigry whereas contamination by cadmium and zinc has not changed during this period. Sulphur dioxide pollution has increased in Szymbark, decreased at Św. Krzyż, while at other Base Stations has been stable without any alterations.