# VII. BADANIA KLIMATU LOKALNEGO NA PRZYKŁADZIE TERENÓW MIEJSKICH I LEŚNYCH

## 7.1. Badania miejskiej wyspy ciepła w Warszawie

Maria Stopa-Boryczka, Jerzy Boryczka, Jolanta Wawer, Katarzyna Grabowska

Celem pracy jest określenie zakresu deformacji pola temperatury powietrza przez miasto w zależności pory doby, roku i warunków pogodowych. Rozwiązania tego problemu przedstawiono na przykładzie Warszawy – miasta nizinnego ( $\varphi$ =52,1°N,  $\lambda$ =21,0°E, H=106 m n.p.m.). Materiały źródłowe pochodzą głównie ze śródmiejskiej Stacji Meteorologicznej "Uniwersytet" Zakładu Klimatologii UW, działającej od 1956 r. Wyniki badań odniesiono do danych ze stacji synoptycznej "Okęcie" (peryferyjnej).

## Zmiany dobowe i roczne miejskiej wyspy ciepła

Wyspa ciepła w Warszawie tj. różnica temperatury powietrza ( $\Delta T = T_m - T_o > 0$ ) między miastem ( $T_m$ ) a peryferiami ( $T_o$ ) cechuje się periodycznymi wahaniami – dobowymi i rocznymi oraz wieloletnimi. Istotne jest poznanie dobowych zmian różnic  $\Delta T$  i wyznaczenie terminów pojawiania się wyspy ciepła, występowania maksimum jej intensywności oraz czasu jej zaniku. Największe różnice temperatury powietrza między miastem i peryferiami ( $\Delta T > 0$ ) występują wieczorem i nocą (table 1, fig. 1 i 2).

Season of the year	Time of appearance of the heat island (h)	Time of appearance of the maksimum (h)	Time of weakening of the island (h)	During the day °C	Extreme values
Winter	16-18	21-24	6-7	$\Delta T > 0$	9.0-11.0
Spring	17-18	24	7-8	$\Delta T \leq 0$	9.0
Summer	18-20	22-24	6-8	$\Delta T \leq 0$	8.0
Autumn	16-18	21-01	6-9	$\Delta T \leq 0$	8.0

**Table 1.** The daily changes of the urban heat island ( $\Delta T > 0$ ) in Warsaw

Wyspa ciepła jest najintensywniejsza w lecie (lipiec), osiągając w centralnych rejonach miasta średnio różnicę ( $\Delta T$ ) ponad 2°C. Przyrosty lub spadki temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) w mieście dostarczają informacji o tempie nagrzewania i wychładzania miasta w stosunku do terenów niezabudowanych. Tereny o gęstej zabudowie (śródmiejskie) cechują się powolniejszym tempem nagrzewania i wychładzania niż peryferyjne, zwłaszcza w miesiącach letnich (table 2, fig. 3a i 3b)(Wawer, 1997).

**Table 2.** The rates of warming and cooling – tendencies in air temperature  $\partial T/\partial t$ ) of the air in downtown Warsaw and in the peripheries (°C/hour)

Seasons	Rates of w	varming – $\partial T / \partial t > 0$	Rates of cooling $-\partial T/\partial t < 0$		
	downtown	periphery - Okęcie	downtown	periphery - Okęcie	
Winter	0.2-0.1	0.2-0.1 1.5-2.5		1.0-3.0	
Spring	0.3-2.0	1.0-3.0	0.1-0.7	1.03.0	
Summer	1.0	1.0-3.0	<1.0	1-5	
Autumn	1.0-2.0	1.0-3.0	1.0-2.0	2.0-3.0	



Fig. 1. The annual changes of the differences of air temperature: of the daily average ( $\Delta T$ ), maximum temperature ( $\Delta T_{max}$ ), minimum temperature ( $\Delta T_{min}$ ) and daily amplitude ( $\Delta A$ ) between the town (University) and its peripheries (Okęcie) (1961-1965)



Fig. 2. Diurnal changes of intensity of heat Island in Warsaw (1961-1965)



Fig. 3a. The daily changes of air temperature in Warsaw (University – town, Okęcie – peripheries), 5.06.1978



**Fig. 3b.** The daily changes of the tendencies in air temperature (°C/h) – defined by  $\partial T/\partial t$  (*t* – *time*), in Warsaw (University of Warsaw, Okęcie – peripheries), 5.06.1978

## Zależność miejskiej wyspy ciepła od warunków pogodowych

Zmiany przestrzenne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie, w kierunku zachód-wschód w godzinach 16, 18, 20 charakteryzują profile różnic temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między dzielnicami (Jelonki, Wola, Śródmieście, Praga, Marysin) i jego peryferiami (Okęcie). Miejska wyspa ciepła ( $\Delta T$ >0) pojawia się o 16<sup>h</sup> na Jelonkach, o 18<sup>h</sup> i 20<sup>h</sup> występuje na całym profilu W-E, a o 20<sup>h</sup> – jest największa (5.0°C) w Śródmieściu w odległości *x*=8.56 km (table 4, fig. 4).

**Table 4.** Profiles latitudinal  $\Delta T(x)$  (Jelonki, Wola. Śródmieście, Praga, Marysin) changes of air temperature differences (°C) between the town and its vicinity in Warsaw (30.06-22.07 1992) (Przybyłkowska, 2008)

Profiles W-E	Jelonki		Wola		Śródmieście		Praga	Mar	ysin
x km	2.00	2.78	3.67	5.22	7.22	8.56	12.89	17.22	18.89
16 <sup>h</sup>	1.7	-3.0	-2.6	-2,6	-2.6	-2.4	-3.0	-2.1	-3.2
18 <sup>h</sup>	3.1	2.8	2.8	2,6	2.4	2.6	2.4	3.0	
20 <sup>h</sup>	3.4	4.4	4.3	4,7	3.9	5.0	3.1	4.6	



Fig. 4. Profiles latitudinal  $\Delta T(x)$  (Jelonki, Wola. Śródmieście, Praga, Marysin) changes of air temperature differences (°C) between the town and its vicinity in Warsaw (30.06-22.07 1992).



**Fig. 5.** Parabolic dependence of differences mean daily air temperature ( $\Delta T$ ) between the city and its vicinity on cloudiness (*N*), Warsaw (1961-1965)



**Fig. 6** Parabolic dependence of differences mean daily air temperature ( $\Delta T$ ) between the city and its vicinity on the wind velocity ( $\nu$ ), Warsaw (1961-1965)



O zanikaniu miejskiej wyspy ciepła ( $\Delta T$ ) ze wzrostem: temperatury powietrza (T), zachmurzenia (N) i prędkości wiatru (v) informują równania wielomianów regresji 2-go stopnia i ich wykresy (fig. 5-7) oraz ujemne współczynniki regresji wielokrotnej (table 3).

**Table 3.** The dependence of the urban heat island  $(\Delta T)$  upon the air temperature (T), cloudiness (N) and wind velocity  $(\nu)$  outside of town. Equations of regression hyperplanes (R - multiple correlation coefficient)

Cold period (X-III)	$\Delta T$ =-0.0186 T - 0.0687 N -0.1479 v+1.448	R=0.58
Warm period (IV-IX)	$\Delta T$ =-0.0105 T- 0.0105 N -0.1082 v+1.329	R=0.58
Year (I-XII)	$\Delta T$ =-0.0105 T- 0.0105 N -0.1082 v+1.329	R=0.56

#### Prawdopodobieństwo występowania miejskiej wyspy ciepła

Istotne znaczenie praktyczne ma porównanie histogramu i dystrybuanty empirycznej (częstości skumulowanych) średnich miesięcznych różnic temperatury powietrza ( $x=\Delta T$ ) w Warszawie (1976-1980) między miastem (Uniwersytet) i peryferiami (Okęcie) o 19<sup>h</sup> z rozkładem normalnym  $f(t)=(2\pi)^{0.5}exp[-0,5t^2]-w$  przedziale  $-4,0 < t \le 4$ , gdzie  $t=(x-x_{st})/s$ ,  $x_{st}$  – średnia arytmetyczna, s – odchylenie standardowe. Z porównania histogramów i wykresów dystrybuant (fig. 8a i 8b) (a także zastosowania testu zgodności Kołmogorowa) wynika, że różnice  $\Delta T$  o godzinie 19<sup>00</sup> mają rozkład prawdopodobieństwa zbliżony do normalnego. Prawdopodobieństwo wystąpienia różnicy  $\Delta T$  powyżej  $x_0$ :  $P(x>x_0)=P(t>t_0)$  jest równe 1- $F(t_0)$ , gdzie  $t_0=(x_0-0,853)/0,319$ . Prawdopodobieństwo wystąpienia o godzinie 19<sup>00</sup> różnic  $\Delta T$ :  $\ge 0,5^{\circ}$ C,  $\ge 1,0^{\circ}$ C,  $\ge 1,5^{\circ}$ C (po standaryzacji:  $t \ge -1,105, \ge 0,459$ ,  $\ge 2,023$ ) odpowiednio wynosi: 86,4%, 32,6 %, 2,3 %.



Fig. 8a. The histograms of air temperature differences ( $\Delta T$ ) between town (University) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1976-1980, 19h)



Fig. 8b. The probability of air temperature differences ( $\Delta T$ ) between town (University) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1976-1980, 19h) (wg danych Domazat, 2007)

## Cykliczność i tendencje zmian miejskiej wyspy ciepła

Miejska wyspa ciepła ( $\Delta T > 0$ ) w Warszawie w latach 1951-2000 cechuje się okresowością wieloletnią. Cykle różnic  $\Delta T$  wyznaczono z zastosowaniem metody sinusoid regresji J. Boryczki (1998), polegającej na dopasowaniu (wg najmniejszych kwadratów) kolejnych sinusoid regresji o domniemanych okresach  $\Theta = 0.1, 0.2, ..., n$  lat do wyników pomiarów:  $\Delta T = a_0 + b \sin(2\pi t/\Theta + c)$ , gdzie: t - czas,  $\Theta - okres$ , b - amplituda, c - faza. Okresy  $\Theta$  są minimami lokalnymi ciągu wariancji resztkowej  $\varepsilon^2$  (widma, spectrum).

Na przykład w lipcu (fig. 9, table 5), okresy wynoszą:  $\Theta = 9.3$ ,  $\Theta = 12.1$ ,  $\Theta = 16.5$ i  $\Theta = 28.5$  lat – o amplitudach ( $\Delta T_{max}$ - $\Delta T_{min} = 2b$ ): 0.20, 0.15, 0.26, 0.09°C.



Fig. 9. Spectrum of the changes of air temperature differences (°C) between the town (Astronomical Observatory) and its vicinity (Okęcie) in Warsaw (1951-2000)

**Table 5.** The cycles of air temperature differences between thetown (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) inWarsaw (1951-2000), R - Correlation coefficient

Periods ( $\Theta$ , years)	Amplitudes (2b, °C)	Phase (c)	R
5,5	0,164	1,5430	0,297
9,3	0,198	-2,0295	0,377
12,1	0,154	0,4509	0,276
16,5	0,260	2,4071	0,513
28,5	0,088	2,1787	0,310

Tendencje zmian różnic temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między Śródmieściem Warszawy (Astronomical Observatory) i peryferiami (Okęcie) w latach 1951-2000, określone równaniami prostych regresji wynoszą: Winter – 0.042, Spring – 0.035, Summer – 0.067, Autumn – 0.031, Year – 0.046°C/10 years (table 6, figure 10)(Kicińska, Wawer, 2005).

Season	Linear regression equations $\Delta T = at + b$	Correlation Coefficients (r)
Winter	$\Delta T = 0.0042 \ t - 8.01$	0.316
Spring	$\Delta T = 0.0036 \ t - 6.73$	0.320
Summer	$\Delta T = 0.0067 \ t - 12.80$	0.500
Autumn	$\Delta T = 0.0031 t - 5.83$	0.265
Year	$\Delta T = 0.0046 \ t - 8.71$	0.458

**Table 6.** The tendencies changes (*a*) of the urban heat island  $(\Delta T)$  in Warsaw (1951-2000)



1950 1970 1980 1990 1960 2000

Zbadano też zmiany zasobów ciepła w mieście względem otoczenia w latach 1960-1980. Znając różnice temperatury powietrza ( $\Delta T = T_m - T_o$ ) między miastem ( $T_m$  – Uniwersytet) i peryferiami (To - Okęcie) oszacowano względne dobowe zasoby ciepła w Warszawie (Stopa-Boryczka, Boryczka i inni, 1995) (fig.11).



Fig. 11. The changes of relative heat resources  $\Delta Q$  (G J) in Warsaw in the 1960-1980 years

Powietrze (o temperaturze  $T_0$ ) napływające do miasta (o temperaturze wyższej  $T_m > T_0$ ) otrzymuje ilość ciepła  $\Delta Q$ , określoną wzorem:

$$\Delta Q = M c_{\rm p} \Delta T$$

gdzie:  $\Delta T$  – różnica temperatury powietrza między terenem zabudowanym i otwartym;  $M = \rho V$  – masa,  $\rho$  – gęstość powietrza, V – objętość powietrza;  $c_p$  – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu.

Przykładowo, oszacowano zasoby ciepła w śródmieściu Warszawy w przyziemnej warstwie atmosfery 0-2 m, o objętości  $V=72\cdot10^6\text{m}^3$  i masie  $M=9\cdot10^4 t$ . Zmiany względnych zasobów ciepła ( $\Delta Q$ ) w śródmieściu Warszawy w latach 1960-1980 opisuje wielomian regresji 4-tego stopnia:

$$\Delta Q = 0.00002458t^4 - 0.001125t^3 + 0.01690t^2 - 0.0944t + 0.977$$

Zasoby ciepła w mieście ulegają znacznym wahaniom z roku na rok – od kilku do kilkudziesięciu GJ.

Zwarta zabudowa w Śródmieściu Warszawy wyróżnia się większą stabilnością temperatury powietrza – dłuższym utrzymaniem większych jej wartości niż na peryferiach, co jest naturalną konsekwencją zanieczyszczenia, utrudniającego swobodne wypromieniowanie ciepła z nagrzanej zabudowy śródmiejskiej.

Istotny wpływ na pionowy i poziomy ruch powietrza w mieście ma stratyfikacja atmosfery. Ponieważ centralna część miasta nagrzewa się silniej aniżeli tereny otaczające, w ciepłej porze roku zwłaszcza w ciągu dnia słonecznego, nad miastem wytwarza się zwykle równowaga chwiejna. Sprzyja to rozwojowi prądów konwekcyjnych – turbulencji wynoszącej powietrze na większą wysokość, wywołuje tym samym proces naturalnego oczyszczania przygruntowej warstwy powietrza lub przynajmniej zapobiega dalszemu gromadzeniu się zanieczyszczeń.

Zróżnicowanie temperatury między centrum i peryferiami, nawet nocą w półroczu letnim, jest również korzystne ze względu na proces samooczyszczania się powietrza nad miastem. Na peryferiach – zwłaszcza przy słabych wiatrach i niebie pogodnym – często występują inwersje temperatury (równowaga stała atmosfery), powodujące stagnację chłodnego powietrza przy gruncie. Tymczasem owa śródmiejska wyspa ciepła, jeśli nie przyczynia się do powstawania równowagi chwiejnej i prądów wstępujących, to w każdym razie utrudnia stabilność uwarstwienia, podtrzymuje istnienie dyfuzji turbulencyjnej, która powoduje zmniejszenie się zawartości aerozoli w przyziemnej warstwie atmosfery.

Problemy badawcze miejskiej wyspy ciepła w Warszawie należą do najczęściej podejmowanych tematów w latach 1959-2010 – w kilku pracach doktorskich, w kilkudziesięciu magisterskich oraz kilkudziesięciu publikacjach.

#### Literatura

Boryczka J., 1998, Zmiany klimatu Ziemi, Wyd. Akademickie DIALOG, Warszawa

- Domazat K., 2007, *Warunki zanikania miejskiej wyspy ciepła w Warszawie* (praca magisterska opiekun naukowy: J. Wawer)
- Kicińska B, Wawer J. 2005, *Urban climate 8. Weather and air conditions.* [w:] Urban Sprawl Warsaw Agglomeration case study (ed. M. Gutry-Korycka), Wyd. WGSR

- Kossowska-Cezak U., 1976, Zmiany roczne różnic temperatury powietrza między śródmieściem a peryferiami Warszawy. Prace i Studia IG UW, seria Klimatologia, z. 8
- Kossowska-Cezak U., 2000, The differences of air temperature between the downtown and the peripheries of Warsaw in the year 1933-1998. "Miscellanea Geographica", t. 9
- Przybyłkowska B., 2008, Zróżnicowanie klimatu lokalnego Warszawy na profilu wschód-zachód (praca magisterska opiekun naukowy: Maria Kopacz-Lembowicz). w: Klimat Wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952-2007. Materiały Zakładu Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego na XII Piknik Naukowy Polskiego Radia BIS i Centrum Nauki Kopernik, Warszawa
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Błażek E., Skrzypczuk J., 1995, Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. T. IX, Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy. Wyd. UW, Warszawa
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Wawer J., 2002, The climate of Warsaw In the research conducted At the Department of Climatology of Warsaw University. "Miscellanea Geographica" t. 10
- Stopa-Boryczka M. (red.), 2003, *Studies on the climate of Warsaw*. Warsaw University Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2008, Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. T. XXII, Wpływ zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie. Wyd. UW, Warszawa
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2010, Atlas współzależności parametrów meteorologiczny i geograficznych w Polsce. T. XXIV, Klimat Warszawy i miejscowości strefy podmiejskiej. Wyd. UW, Warszawa
- Wawer J., 1997, Miejska wyspa ciepła w Warszawie. "Prace i Studia Geograficzne", t. 20
- Wawer J., 1999, Zależność miejskiej wyspy ciepła od cyrkulacji atmosferycznej. "Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica", 3.

# 7.2. Wpływ zbiorowisk leśnych na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Puszczy Boreckiej (autoreferat pracy doktorskiej)

## Katarzyna Pietras

#### Cel pracy, materiały źródłowe, metody badań

Badania nad wpływem lasu na: prędkość wiatru, temperaturę powietrza, wilgotność względną, opady atmosferyczne (i ich intercepcję) prowadzone były już od dawna. Las traktowano w nich jako całość, nie uwzględniając wewnętrznego zróżnicowania związanego z różnorodnością zbiorowisk leśnych, lub uwzględniano tylko jeden, wybrany typ roślinności.

Rzadko podejmowano temat zależności temperatury i wilgotności powietrza od wysokości nad poziomem gruntu w lesie (pomiary prowadzono przeważnie na jednej wysokości) w cyklu dobowym. Nie ma prac dotyczących wpływu zbiorowisk leśnych na zróżnicowanie wilgotności bezwzględnej powietrza (zawartość pary wodnej w powietrzu) w lesie.

Celem pracy jest określenie wpływu zbiorowisk leśnych Puszczy Boreckiej: lasu mieszanego, boru bagiennego, grądu, olsu i świerczyny na dobowe wahania: temperatury powietrza, różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym, pionowych gradientów temperatury powietrza w warstwie 0,25-5,0 m oraz wilgotności bezwzględnej powietrza w ciągu roku, w zależności od warunków baryczno-solarnych, tj. od ciśnienia atmosferycznego i dobowych sum promieniowania słonecznego.

Ważnym problemem jest również określenie zależności różnic temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym od: dobowych sum promieniowania całkowitego, ciśnienia atmosferycznego i Oscylacji Północnoatlantyckiej.



**Rys. 1.** Rozmieszczenie punktów pomiarowych w Puszczy Boreckiej, Źródło: Mapa turystyczna Pojezierze Suwalskie i Ełckie, 1:120 000, Wydawnictwo Fotograficzno-Kartograficzne Fotokart, Warszawa



Rys. 4. Grąd

Rys. 5. Ols



Rys. 6. Świerczyna

Rys. 7. Teren otwarty

Źródło: zbiory prywatne K. Pietras

Badania na potrzeby rozprawy doktorskiej prowadzono w Puszczy Boreckiej od 1 marca 2007 roku to 29 lutego 2008 roku. W tym czasie elektroniczne rejestratory temperatury i wilgotności względnej powietrza EBI-20-TH co 10 minut mierzyły i rejestrowały temperaturę i wilgotność względną powietrza na wysokości 0,25 m, 2,0 m i 5,0 m nad poziomem gruntu.

Sieć pomiarowa obejmowała sześć punktów (rys. 1). Pięć z nich położonych było w zbiorowiskach leśnych o zróżnicowanym składzie gatunkowym, zwartości koron drzew, gęstości runa i podszytu, a także wilgotności podłoża. Były to: las mieszany, bór bagienny, grąd, ols i świerczyna (rys. 2-7). Do badań wybrano płaty roślinności o dużej powierzchni, typowe dla poszczególnych zbiorowisk leśnych, położone z dala od granicy lasu oraz zbiorników wodnych.

Szósta powierzchnia pomiarowa zlokalizowana była w terenie otwartym, w odległości około 1,5 km na zachód od granicy Puszczy Boreckiej (rys. 6). Dane zbierane tam służyły jako punkt odniesienia do wszelkich badań zróżnicowania klimatu wnętrza lasu.

Żeby określić wpływ zbiorowisk leśnych na zawartość pary wodnej w powietrzu wyznaczono wilgotność bezwzględną (gęstość pary wodnej) w gm<sup>-3</sup> ze wzoru:

$$\rho = 216, 7e/T$$

gdzie: T – temperatura powietrza (K), e = ciśnienie pary wodnej (hPa)

Zmierzone wartości temperatury powietrza (*T*) i wilgotności względnej (*f*) umożliwiły wyznaczenie ciśnienia pary wodnej (e=0,01fE), ze wzorów psychrometrycznych na maksymalne ciśnienie pary wodnej (*E*) nad wodą i lodem (Kostryko i inni, 1982). Podstawowym problemem badawczym w pracy jest określenie wpływu zbiorowisk leśnych na klimat lokalny w zależności od ciśnienia i promieniowania słonecznego. W związku z tym każdy dzień okresu pomiarów przyporządkowano do jednej z czterech grup warunków baryczno-radiacynych. W tym celu, wykorzystując dane ze Stacji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska na Diablej Górze, obliczono średnie dobowe wartości ciśnienia atmosferycznego i dobowe sumy całkowitego promieniowania słonecznego w porach roku (tab. 1).

Następnie, w odniesieniu do średnich wartości ciśnienia atmosferycznego ( $p_{\text{śr}}$ ) i dobowych sum promieniowania słonecznego ( $I_{\text{śr}}$ )(tab. 2),w każdej porze roku wydzielono cztery grupy dni pod względem warunków baryczno-radiacyjnych.

Pory roku	Średnie ciśnienie atmosferyczne (hPa)	Dobowe sumy promieniowania całkowitego (MJm <sup>-2</sup> )
Wiosna (III-V)	996,4	14,5
Lato (VI-VIII)	993,4	16,5
Jesień (IX-XI)	997,6	5,7
Zima (XII-II)	999,9	1,8

 Tabela 1. Średnie dobowe wartości ciśnienia atmosferycznego i dobowe sumy promieniowania słonecznego w porach roku na Diablej Górze

Tabela	2.	Kryterium	klasyfikacji	dni	0	różnych	warunkach	baryczno-
solarnyo	ch v	v Puszczy E	Boreckiej					

Warunki baryczno-solarne	Ciśn atmosfery	ienie czne (hPa)	Dobowe sumy promieniowania całkowitego (MJm <sup>-2</sup> )		
I grupa	p≤p <sub>śr</sub> niskie		$I \leq I_{ m \acute{s}r}$	małe	
II grupa	$p \le p_{\text{sr}}$	niskie	I>I <sub>śr</sub>	duże	
III grupa	$p > p_{\text{sr}}$	wysokie	$I \leq I_{ m \acute{s}r}$	małe	
IV grupa	$p > p_{\text{sr}}$	wysokie	I>I <sub>śr</sub>	duże	

W celu określenia w jaki sposób badane zbiorowiska leśne wpływają na temperaturę powietrza, na podstawie całodobowych danych empirycznych (z odstępem co 30 minut), wyznaczono różnice temperatury między badanymi zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym.

Wielu interesujących informacji dotyczących wpływu zbiorowisk leśnych na warunki termiczne dostarczają pionowe gradienty temperatury powietrza w warstwie 0,25-5,0 m n.p.g. Wyznaczono je posługując się definicją ogólnie przyjętą w meteorologii dynamicznej (Kopcewicz 1956, Niedźwiedź 2003). Pionowy gradient temperatury powietrza ( $\gamma$ ) – to zmiany temperatury (T) na jednostkę wysokości (z) ze znakiem przeciwnym:

$$\gamma = -\partial T / \partial z$$

Jego wartości (°C/m) obliczono z wzoru:

$$\gamma = -(T_{5,0} - T_{0,25})/4,75,$$

gdzie:  $T_{0,25}$ ,  $T_{5,0}$  – wartości temperatury powietrza (°C) na poziomach: z=0,25 i z=5,0 m Istotne znaczenie poznawcze mają porównania średnich dobowych przebiegów:

• temperatury powietrza,

- różnic temperatury powietrza między badanymi zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym,
- pionowych gradientów temperatury powietrza w warstwie 0,25-5,0 m n.p.g.,
- wilgotności bezwzględnej powietrza,

w podziale na:

- pory roku: wiosnę (III-V), lato (VI-VIII), jesień (IX-XI) i zimę (XII-II)
- trzy wysokości nad poziomem gruntu: 0,25, 2,0, 5,0 m.
- cztery rodzaje warunków baryczno-solarnych.

W badaniach zastosowano wielomiany regresji 2. stopnia zmiennej y względem x:

$$y = a_1 x^2 + a_2 x + a_0$$

Jako zmienną zależną (y) przyjęto różnice temperatury ( $\Delta T$ ) oraz wilgotności bezwzględnej powietrza ( $\Delta \rho$ ) między poszczególnymi zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym. Zmiennymi niezależnymi (x) są: odpowiednio temperatura ( $T_{\text{TO}}$ ) lub wilgotność bezwzględna powietrza ( $\rho_{\text{TO}}$ ) w terenie otwartym, suma dobowa promieniowania całkowitego (I), ciśnienie atmosferyczne (p) i wskaźnik Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO).

O zróżnicowaniu temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza w poszczególnych zbiorowiskach leśnych Puszczy Boreckiej w zależności od: temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza w terenie otwartym, promieniowania, ciśnienia atmosferycznego i wskaźnika *NAO* informują ekstrema parabol regresji.

Łączny wpływ promieniowania słonecznego, ciśnienia atmosferycznego i Oscylacji Północnoatlantyckiej na temperaturę lub wilgotność bezwzględną powietrza w Puszczy Boreckiej określono za pomocą równań hiperpłaszczyzn regresji (wyznaczonych za pomocą programu Excel, REGLINP):

$$\Delta y = a_1 I + a_2 p + a_3 NAO + a_0$$

gdzie:  $\Delta y - różnice$  temperatury ( $\Delta T$ ) lub wilgotności bezwzględnej ( $\Delta \rho$ ) powietrza między poszczególnymi zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym, I - dobowe sumy promieniowania, p - ciśnienie atmosferyczne, NAO - wskaźnik Oscylacji Północnoatlantyckiej,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3 -$  współczynniki regresji wielokrotnej.

Standaryzowane równania hiperpłaszczyzn regresji otrzymano standaryzując różnice temperatury powietrza ( $\Delta T'$ ) i wilgotności bezwzględnej ( $\Delta \rho'$ ) oraz dobowe sumy promieniowania (I'), ciśnienie atmosferyczne (p') i wskaźnik Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO'):

$$\Delta y' = a'_1 I' + a'_2 p' + a'_3 NAO'$$

gdzie: a1', a2', a3' - standaryzowane współczynniki regresji wielokrotnej.

Miarą dokładności opisu danych empirycznych równaniami parabol regresji 2. stopnia są współczynniki determinacji ( $R^2$ ), a w przypadku równań hiperpłaszczyzn regresji – współczynniki korelacji wielokrotnej (R).

Istotność statystyczną współczynników determinacji  $R^2$  i współczynników korelacji wielokrotnej R oceniono, stosując test Fishera-Snedecora:

$$F_{\text{obl}} = (n-k-1)k^{-1}R^{2}(1-R^{2})^{-1}$$

o  $n_1 = k$  i  $n_2 = n - k - 1$  stopniach swobody, przyjmując poziomy istotności  $\alpha = 0.05$  i  $\alpha = 0.10$ .

(in pousitive note to be the to be the to be the to be the to be the to be to be the to be to be the to be t											
Wielom	iany k=2, k	R <sup>2</sup> kr	Hiperpłaszczyzny $k=3, R_{kr}$								
Liczebność	a=0,05	a=0,10	Liczebność $a=0,05$ $a=0,15$								
n=92	n=92 0,0651 0,0504		n=92	0,240	0,214						
n=366	0,0164	0,0127	n=366	0,119	0,107						

**Tabela 3.** Wartości krytyczne współczynników determinacji  $R^2_{kr}$  i współczynników korelacji wielokrotnej  $R_{kr}$  (na podstawie tablic rozkładu F)

Jeżeli wartości obliczone są większe od wartości krytycznych (tab. 3), to zależności traktowano jako istotne statystycznie.

Podobieństwo badanych zbiorowisk leśnych i terenu otwartego pod względem cech temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza w kolejnych miesiącach zbadano, wykorzystując metodę grupowania hierarchicznego Warda, w której skupienia są tworzone tak, by suma kwadratów odległości przy kolejnych łączeniach była jak najmniejsza (po standaryzacji wartości zmierzonych). Jako funkcję podobieństwa zastosowano odległości euklidesowe w przestrzeni wielowymiarowej (Parysek 1982).

## Cechy fizycznogeograficzne Puszczy Boreckiej

Jako teren badań wybrano Puszczę Borecką, położoną na północo-wschód od Giżycka. Jest to zespół leśny o powierzchni około 200 km<sup>2</sup>, wyróżniający się przestrzenną zwartością drzewostanu oraz stosunkowo niewielkim przekształceniem przez człowieka. Jego cechą specyficzną jest duży udział lasów liściastych i mieszanych, odznaczających się pierwotnym wykształceniem drzewostanów. Istotne jest również duże zróżnicowanie zbiorowisk leśnych oraz zgodność siedlisk z porastającą je roślinnością, a także ich duża zmienność przestrzenna, związana głównie z morfologią terenu (Polakowski 1961, Kondracki 1972, Stasiak 1985).

# Zmiany dobowe temperatury powietrza w zbiorowiskach leśnych i terenie otwartym w porach roku

#### Przebieg dobowy temperatury powietrza w Puszczy Boreckiej

We wszystkich zbiorowiskach leśnych, na trzech wysokościach nad poziomem gruntu wyodrębnione warunki baryczno-radiacyjne można podzielić na dwie grupy charakteryzujące się podobnymi średnimi dobowymi przebiegami temperatury powietrza (rys. 8 i 9). Wiosną, w lecie i jesienią jedną grupę stanowią dni z promieniowaniem większym od średniego, drugą zaś dni z promieniowaniem mniejszym od średniego. Ze względu na długi czas insolacji promieniowanie jest w tym okresie dominujący czynnik kształtujący warunki pogodowe. Zimą natomiast wiele podobieństw wykazują dobowe przebiegi temperatury powietrza podczas dni z ciśnieniem większym od średniego, a także podczas dni z ciśnieniem mniejszym od średniego. Analogiczna prawidłowość dotyczy dobowy przebiegów różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym, pionowych gradientów termicznych oraz dobowych przebiegów wilgotności bezwzględnej powietrza.



**Rys. 8.** Przebiegi dobowe temperatury powietrza w lesie mieszanym na wysokości 0,25 m – jesień



Średnie dobowe przebiegi temperatury powietrza w badanych zbiorowiskach leśnych, podczas takich samych warunków baryczno-radiacyjnych, w jednej porze roku, na tej samej wysokości są podobne. Temperatura minimalna we wszystkich zbiorowiskach leśnych występuje w tym samym czasie tj. przed wschodem słońca. Charakterystyczny jest również większe natężenie wzrostu temperatury powietrza w godzinach przedpołudniowych niż jej spadku po południu.

Każde zbiorowisko leśne wyróżnia się jednak specyficznymi cechami (rys 10 i 11). Przykładowo: w olsie wysoka temperatura powietrza utrzymuje się bardzo krótko. Bór bagienny charakteryzuje się szybkim wzrostem temperatury powietrza w godzinach przedpołudniowych. W grądzie wzrost temperatury powietrza trwa najdłużej. W świerczynie występują najmniejsze dobowe amplitudy temperatury powietrza i jej najmniejsze chwilowe wahania.



**Rys. 10.** Przebiegi dobowe temperatury powietrza w zbiorowiskach leśnych na wysokości 0,25 m, podczas  $p \le p_{sr}$  i  $I > I_{sr} - lato$ 

**Rys. 11.** Przebiegi dobowe temperatury powietrza w zbiorowiskach leśnych na wysokości 0,25 m, podczas p≤p<sub>śr</sub> i I>I<sub>śr</sub> – zima

Wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem gruntu rosną dobowe amplitudy temperatury powietrza. W lecie w świerczynie amplituda temperatury powietrza na wysokości 0,25 m wynosiła niecałe 6,5°C, a na wysokości 5,0 m – ponad 8,0°C, gdy  $p > p_{sr} iI > I_{sr}$ (rys. 2). Na wysokości 5,0 m różnice między średnimi dobowymi przebiegami temperatury powietrza podczas dni o odmiennych warunkach baryczno-radiacyjnych także są większe. Jest to związane z pionową strukturą roślinności leśnej, która pochłania część promieniowania słonecznego, docierającego pod korony drzew.



Rys. 12. Przebiegi dobowe temperatury powietrza w świerczynie na różnych wysokościach, podczas  $p > p_{\text{sr}}$  i  $I > I_{\text{sr}} - \text{lato}$ 

## Przebieg dobowy różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym

Średnie dobowe przebiegi różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym mają zbliżone cechy niezależnie od rodzaju warunków barycznoradiacyjnych, pory roku oraz wysokości nad poziomem gruntu. Różnice temperatury powietrza między badanymi zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym są najmniejsze od północy do wschodu Słońca. Następnie po wschodzie Słońca szybko rosną i osiągają największe wartości przed południem (w lecie w świerczynie podczas  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$  dochodziły do 13,0°C). Spadek różnic temperatury powietrza w godzinach popołudniowych trwa znacznie dłużej niż ich poranny wzrost. Przykładowo, przedstawiono dobowe przebiegi różnic temperatury powietrza między świerczyna i terenem otwartym w lecie i jesienią, na wysokości 0,25 m – w dniach o różnych warunkach baryczno-radiacyjnych – rys 13 i 14.



Rys. 13. Przebiegi dobowe różnic temperatury powysokości 0,25 m - lato

Rys. 14. Przebiegi dobowe różnic temperatury powietrza między świerczyną i terenem otwartym na wietrza między świerczyną i terenem otwartym na wysokości 0,25 m - jesień

Różnice temperatury powietrza między poszczególnymi zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym są największe na wysokości 0,25 m, w ciągu całego roku, we wszystkich grupach warunków baryczno-radiacyjnych. Ze względu na bardzo duży wpływ jaki w terenie otwartym wywiera podłoże (stopień jego nagrzania lub wychłodzenia) na temperaturę powietrza. Przykładowo na rysunkach 15 i 16 przedstawiono dobowe przebiegi różnic temperatury powietrza między olsem, borem bagiennym i terenem otwartym, w lecie, podczas  $p > p_{\text{sr}}$  i  $I \le I_{\text{sr}}$ .





podczas  $p > p_{\text{sr}}$  i  $I \le I_{\text{sr}} - \text{lato}$ 

Rys. 15. Przebiegi dobowe różnic temperatury Rys. 16. Przebiegi dobowe różnic temperatury powietrza między olsem i terenem otwartym, powietrza między borem bagiennym i terenem otwartym, podczas  $p > p_{ST}$  i  $I \le I_{ST}$  – lato

W ciągu dnia, wiosną i w lecie, temperatura powietrza pod koronami drzew we wszystkich zbiorowiskach leśnych jest niższa niż w terenie otwartym, niezależnie od wysokości nad poziomem gruntu i rodzaju warunków baryczno-solarnych. Przyczyną tego jest zmniejszenie dopływu promieniowania słonecznego do podłoża pod koronami drzew. Jesienią natomiast, a przede wszystkim w zimie, w dzień w lesie jest przeważnie cieplej niż w terenie otwartym, ponieważ roślinność, nawet pozbawiona liści zmniejsza straty energii i ogranicza przewietrzanie (tab. 4 i 5). Przykładowo w grądzie, podczas  $p \le p_{ST}$ , I≤Isr, w zimie jest o 1,50°C cieplej niż poza lasem. Do podobnych wniosków doszli A. Bednarek, W. Huculak, L. i W. Ożgowie na podstawie badań w lasach rogowskich.

				Zima					
Godzina	Las mieszany	Bór bagienny	Grąd	Ols	Świerczyna	Las mieszany	Bór bagienny	Grąd	Świerczyna
000	-0,80	-0,80	-0,50	-0,90	-0,70	1,10	1,10	1,10	0,80
600	-1,10	-1,10	-0,80	-1,10	-1,20	1,10	1,10	1,10	0,70
1200	-3,20	-2,40	-2,70	-2,10	-3,50	0,70	1,00	1,00	0,00
1800	-2,20	-1,80	-1,70	-1,50	-2,70	1,40	1,40	1,50	0,80

Tabela 4. Różnice temperatury powietrza (°C) między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym na wysokości 0,25 m o godzinie 0<sup>00</sup>, 6<sup>00</sup>, 12<sup>00</sup> i 18<sup>00</sup> podczas  $p \le p_{\text{sr}}$ ,  $I \le I_{\text{sr}}$ 

Tabela 5. Różnice temperatury powietrza (°C) między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym na wysokości 0,25 m o godzinie  $0^{00}$ ,  $6^{00}$ ,  $12^{00}$  i  $18^{00}$  podczas  $p > p_{ST}$ ,  $I > I_{ST}$ 

			Lato		Zima				
Godzina	Las mieszany	Bór bagienny	Grąd	Ols	Świerczyna	Las mieszany	Bór bagienny	Grąd	Świerczyna
000	-0,40	-0,60	-0,30	-0,70	0,20	0,40	0,30	0,40	0,20
600	-4,20	-4,40	-4,20	-4,10	-3,80	0,70	0,40	0,60	0,50
1200	-5,70	-3,60	-4,70	-4,40	-5,80	-0,50	-0,10	-0,10	-1,20
1800	-5,90	-5,30	-4,70	-4,40	-6,20	0,40	0,20	0,40	0,20

Średnie dobowe przebiegi różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym, w tej samej porze roku i podczas takich samych warunków baryczno-radiacynych, są podobne (rys. 17 i 18). Jednak każde zbiorowisko leśne ma cechy indywidualne. Przykładowo wiosną: dobowe amplitudy różnic temperatury powietrza w świerczynie są największe, a olsie – najmniejsze. Bór bagienny oraz grąd w godzinach przedpołudniowych chwilowo stają się cieplejsze niż teren otwarty. W świerczynie okres, gdy temperatura jest niższa niż w terenie otwartym jest najkrótszy. Las mieszany cechuje się najmniejszym natężeniem wzrostu różnic temperatury względem terenu otwartego. W olsie i świerczynie chwilowe wahania wartości różnic temperatury są mniejsze niż w pozostały zbiorowiskach leśnych.



**Rys. 17.** Przebiegi dobowe różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym na wysokości 0,25 m, podczas  $p \le p_{\text{sr}}$ i  $I \le I_{\text{sr}}$  – wiosna

**Rys. 18.** Przebiegi dobowe różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym na wysokości 0,25 m, podczas  $p > p_{sr}$ i  $I > I_{sr} -$  wiosna

12 14 16 18 20 22

----Grac

Ols

# Przebieg dobowy pionowych gradientów temperatury powietrza w warstwie 0,25-5,0 m, w Puszczy Boreckiej

Największe zmiany temperatury powietrza w pionie we wszystkich zbiorowiskach leśnych są w lecie. W lecie również dobowe wahania pionowych gradientów temperatury powietrza w ciągu doby są największe. W zimie natomiast pionowe gradienty temperatury powietrza podczas poszczególnych sytuacji baryczno-radiacyjnych są niemal niezmienne przez całą dobę, poza tym pionowe zmiany temperatury powietrza są w tym czasie małe i nie przekraczają 0,2°C/m (rys 19 i 20). W cyklu dobowym mniejsze zmiany temperatury w pionie są w nocy niż w dzień. Nocą mniejsze są także różnice wartości pionowych gradientów termicznych między poszczególnymi warunkami baryczno-radiacyjnymi, a także między badanymi zbiorowiskami leśnymi niż w dzień.





**Rys. 19.** Przebiegi dobowe pionowych gradientów temperatury powietrza, w zbiorowiskach leśnych, podczas  $p \le p_{\text{sr}}$  i  $I > I_{\text{sr}} - \text{lato}$ 

**Rys. 20.** Przebiegi dobowe pionowych gradientów temperatury powietrza, w zbiorowiskach leśnych, podczas  $p \le p_{\text{sr}}$  i  $I > I_{\text{sr}} - zima$ 

Pod koronami drzew przez całą dobę występuje inwersja temperatury powietrza, która poza nielicznymi wyjątkami, pogłębia się w ciągu dnia (najintensywniejsze inwersje były wiosną oraz latem, wiosną w olsie przekroczyły -0,6°C/m, gdy  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$ ). Jedynie jesienią w nocy we wszystkich zbiorowiskach leśnych, występuje równowaga chwiejna, a w dzień – stała. Przykładowo (rys. 21 i 22) przedstawiono średnie dobowe przebiegi pionowych gradientów temperatury powietrza jesienią podczas dwóch rodzajów pogody z dużym promieniowaniem słonecznym:  $p \le p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$  oraz  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$ .



**Rys. 21.** Przebiegi dobowe pionowych gradientów temperatury powietrza, w zbiorowiskach leśnych, podczas  $p \le p_{sr}$  i  $I > l_{sr} - jesień$ 

**Rys. 22.** Przebiegi dobowe pionowych gradientów temperatury powietrza, w zbiorowiskach leśnych, podczas  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr} - jesień$ 

Średnie dobowe przebiegi pionowych gradientów temperatury powietrza w lesie i w terenie otwartym, niezależnie od warunków baryczno-radiacyjnych i pory roku, charakteryzują się odmiennymi cechami. W lesie przeważają sytuacje inwersyjne utrzymujące się przez większą część doby. W terenie otwartym natomiast w nocy temperatura powietrza rośnie wraz z wysokością, a w ciągu dnia spada (największe zmiany temperatury powietrza w pionie są przed południem). Poza tym w terenie otwartym w ciągu całego roku, pionowe gradienty temperatury powietrza oraz ich dobowe amplitudy, niezależnie od sytuacji pogodowej są większe niż w obrębie Puszczy Boreckiej. O odmiennych cechach pionowych gradientów temperatury powietrza w lesie i w jego otoczeniu decyduje szata roślinna. Porównanie dobowych przebiegów pionowych gradientów temperatury powietrza pod koronami drzew oraz w terenie otwartym przedstawiają rysunki 23 i 24.





**Rys. 23.** Przebiegi dobowe pionowych gradientów temperatury powietrza w świerczynie i w terenie otwartym, podczas  $p > p_{sr}$  i  $I \le I_{sr}$  – lato

**Rys. 24.** Przebiegi dobowe pionowych gradientów temperatury powietrza w świerczynie i w terenie otwartym, podczas  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr} - lato$ 

## Zmiany dobowe wilgotności bezwzględnej powietrza w zbiorowiskach leśnymi i terenie otwartym w porach roku

Wraz ze wzrostem wysokości nad podłożem, będącym źródłem pary wodnej, wilgotność bezwzględna powietrza maleje. Na ogół jest ona najmniejsza na wysokości 2,0 m, lecz na tej wysokości ma największą dobową amplitudę. Drugie maksimum wilgotności bezwzględnej powierza jest na poziomie 5,0 m ze względu na wpływ parowania z koron drzew oraz z warstwy podszytu. Przykładowo przedstawiono dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza w lesie mieszanym na trzech wysokościach: 0,25, 2,0 i 5,0 m nad powierzchnią gruntu wiosną i w lecie (rys. 25 i 26).



wiosna

Rys. 25. Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej Rys. 26. Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza w lesie mieszanym, podczas  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$  powietrza w lesie mieszanym, podczas  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$ lato

Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza w lecie, w jednym zbiorowisku leśnym w niewielkim stopniu zależa od warunków baryczno-solarnych, ponieważ w decydującym czynnikiem kształtującym zawartości pary wodnej w powietrzu jest transpiracja z roślin. W pozostałych porach roku różnice między dobowymi przebiegami wilgotności bezwzględnej powietrza, w zależności od sytuacji baryczno-radiacyjnej są większe. Prawidłowość ta zachodzi na wszystkich badanych wysokościach nad powierzchnią gruntu (rys. 27 i 28).



powietrza w świerczynie na wysokości 0,25 m - lato

Rys. 27. Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej Rys. 28. Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza w świerczynie na wysokości 0,25 m jesień

Wilgotność bezwzględna powietrza pod koronami drzew wiosną, w lecie i jesienia jest przeważnie większa niż w terenie otwartym. Największe różnice występują w godzinach nocnych. W godzinach przedpołudniowych zdarzają się przypadki, gdy zawartość pary wodnej w powietrzu poza lasem jest większa – do podobnych wniosków doszedł W. Ożga na podstawie badań w Rogowie i w Puszczy Białowieskiej (rys. 29). W zimie zaś przy powierzchni gruntu wilgotność bezwzględna powietrza przez całą dobę w grądzie i świerczynie jest większa niż w terenie otwartym, a w lesie mieszanym i borze bagiennym – mniejsza (rys. 30).



**Rys. 29.** Różnice wilgotności bezwzględnej powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym na wysokości 0,25 m, podczas  $p \le p_{sr}$ i  $I > I_{sr} - jesień$ 

**Rys. 30.** Różnice wilgotności bezwzględnej powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym na wysokości 0,25 m, podczas  $p \le p_{\text{sr}}$ i  $l > l_{\text{Sr}} - zima$ 

Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza w badanych zbiorowiskach leśnych, w dniach z tym samym rodzajem warunków baryczno-radiacyjnych, na wszystkich trzech wysokościach są podobne. Jednak każde zbiorowisko leśne wyróżnia się cechami specyficznymi: zakresem wahań wilgotności bezwzględnej powietrza w ciągu doby, długością okresu z wartościami wilgotności zbliżonymi do maksimum, a także występowaniem dwóch maksimów w ciągu doby, co widać na rysunkach 31 i 32.



**Rys. 31.** Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza na wysokości 0,25 m, podczas *p*>*p*<sub>śr</sub> i *l*>*I*<sub>śr</sub> – wiosna

**Rys. 32.** Dobowe przebiegi wilgotności bezwzględnej powietrza na wysokości 5,0 m, podczas  $p > p_{sr}$  i  $I > I_{sr}$  – wiosna

## Wpływ zbiorowisk leśnych na pole temperatury powietrza w Puszczy Boreckiej

Analiza standaryzowanych równań hiperpłaszczyz regresji pozwala stwierdzić, że niezależnie od pory roku największy wpływ na zmiany różnic temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym miały zmiany dobowych sum promieniowania słonecznego (latem różnica spada od 0,77 w olsie do 0,85 w świerczynie, gdy dobowa suma promieniowania rośnie o 1). Rola dwóch pozostałych czynników, tj. ciśnienia atmosferycznego i wskaźnika NAO była mniejsza i zmieniała się w zależności od pory roku. Współczynniki korelacji wielokrotnej R są istotne statystycznie. Największe wartości mają w lecie – od 0,750 w olsie do 0,828 w świerczynie.

	Lato	
Zbiorowisko leśne	Standaryzowane równanie hiperpłaszczyzny regresji	R
Las mieszany	$\Delta T' = -0.841011I' + 0.083882p' - 0.005934NAO'$	0,818
Bór bagienny	$\Delta T' = -0,820516I' + 0,086891p' + 0,025978NAO'$	0,796
Grąd	$\Delta T' = -0,842982I' + 0,090650p' + 0,027722NAO'$	0,818
Ols	$\Delta T^{\circ} = -0,772400I^{\circ} + 0,087013p^{\circ} + 0,055784NAO^{\circ}$	0,750
Świerczyna	$\Delta T' = -0,854340I' + 0,10763p' + 0,058347NAO'$	0,828

**Tabela 6.** Zależność standaryzowanych różnic temperatury powietrza ( $\Delta T'$ ) w zbiorowiskach leśnych od promieniowania (I'), ciśnienia (p') i wskaźnika NAO' (R – współczynnik korelacji wielokrotnej)

## Wpływ zbiorowisk leśnych na pole wilgotności bezwzględnej powietrza w Puszczy Boreckiej

Ze standaryzowanych równań hiperpłaszczyzn regresji wynika, że na zmiany różnic wilgotności bezwzględnej powietrza między wnętrzem lasu i terenem otwartym największy wpływ miał wzrost dobowych sum promieniowania słonecznego (w borze bagiennym latem różnica spadła o 0,38, gdy dobowa suma promieniowania wzrosła o 1). Dwa pozostałe czynniki wpływające na wielkość różnic wilgotności bezwzględnej powietrza niezależnie od pory roku miały mniejsze znaczenie. Współczynniki korelacji opisujące równania hiperpłaszczyzn latem zmieniały się od 0,28 w lesie mieszanym do 0,45 w borze bagiennym.

**Tabela 7.** Zależność standaryzowanych różnic wilgotności bezwzględnej powietrza  $(\Delta \rho')$  w zbiorowiskach leśnych od promieniowania (I'), ciśnienia (p') i wskaźnika NAO' (R – współczynnik korelacji wielokrotnej)

· · ·		
	Lato	
Zbiorowisko leśne	Standaryzowane równanie hiperpłaszczyzny regresji	R
Las mieszany	$\Delta \rho^{2} = -0.079498I^{2} + 0.109464p^{2} + 0.227493NAO^{2}$	0,281
Bór bagienny	$\Delta \rho^{2} = -0.376157I^{2} - 0.117068p^{2} + 0.192048NAO^{2}$	0,446
Grąd	$\Delta \rho^{2} = -0.342359I^{2} - 0.092498p^{2} + 0.220044NAO^{2}$	0,417
Ols	$\Delta \rho' = -0,290490I' - 0,163376p' + 0,187008NAO'$	0,390
Świerczyna	$\Delta \rho^{2} = -0.320547I^{2} - 0.130143p^{2} + 0.179790NAO^{2}$	0,397

# Porównanie temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza zbiorowisk leśnych i terenu otwartego z zastosowaniem analizy skupień (grupowania hierarchicznego)

#### Podobieństwo zmian dobowych temperatury powietrza

Analiza podobieństw zbiorowisk leśnych i terenu otwartego z wykorzystaniem grupowania hierarchicznego pozwala stwierdzić, że zwartość okapu koron drzew jest najważniejszym czynnikiem kształtującym warunki termiczne we wnętrzu lasu. Od gęstości koron drzew zależy od ilość promieniowania słonecznego docierającego do podłoża w ciągu dnia i wielkość nocnego wypromieniowania.







**Rys. 35.** Podobieństwa dobowych charakterystyk temperatury powietrza w zbiorowiskach leśnych i w terenie otwartym – październik







**Rys. 36.** Podobieństwa dobowych charakterystyk temperatury powietrza w zbiorowiskach leśnych i w terenie otwartym – luty

Zbiorowiskiem leśnym, które wykazuje bardzo dużą indywidualność cech termicznych jest świerczyna, która przez cały rok charakteryzuje się niezmienną, dużą zwartością koron drzew. W pozostałych badanych zbiorowiskach leśnych gęstość roślinności zmienia się w ciągu roku. W lecie warunki termiczne w obrębie lasu są podobne, ponieważ roślinność znajduje się w pełni rozwoju. W tym czasie największą indywidualnością wyróżnia się punkt położony w terenie otwartym. W zimie zbiorowiska leśne z dużym udziałem roślinności liściastej (grąd bór bagienny, las mieszany) mają cechy zbliżone do terenu otwartego. Wnioski te potwierdzają wyniki badań J. L. Olszewskiego prowadzone w Pusz-czy Białowieskiej.

#### Podobieństwo zmian dobowych wilgotności bezwzględnej powietrza

Analiza podobieństw zbiorowisk leśnych i terenu otwartego pod względem cech wilgotności bezwzględnej powietrza metodą J.H. Warda nie dała tak jednoznacznych wyników jak w przypadku temperatury powietrza. Najmniejsze różnice zawartości pary wodnej w powietrzu między badanymi zbiorowiskami leśnymi są w lecie. Poza tym w każdym miesiącu podobieństwa między poszczególnymi powierzchniami badawczymi kształtują się inaczej, niezależnie od zwartości koron drzew i wilgotności podłoża.

#### Podsumowanie

- Zbiorowiska leśne w Puszczy Boreckiej wyróżniają się odrębnymi cechami warunków termicznych i wilgotnościowych, zwłaszcza dobowymi wahaniami temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza.
- Dobowe przebiegi temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza w zbiorowiskach leśnych w Puszczy Boreckiej najbardziej zależą od warunków baryczno-radiacyjnych.
- Zwartość koron drzew jest ważnym czynnikiem wpływającym na warunki termiczne w lesie. Natomiast niewielki jest jej wpływ na zawartość pary wodnej w powietrzu.

- Pod koronami drzew przez większą część doby utrzymuje się inwersja temperatury powietrza, która pogłębia się w ciągu dnia (inaczej niż w terenie otwartym). Intensywność i zakres dobowych wahań inwersji temperatury powietrza są największe w lecie.
- Najmniejszą zmiennością i największą odrębnością warunków termicznych (spośród zbiorowisk leśnych) cechuje się świerczyna – o dużej i stałej (w ciągu całego roku) zwartości koron drzew.
- Cechy termiczne wszystkich zbiorowiskach leśnych w lecie są podobne, w przejściowych porach roku jest duże zróżnicowanie temperatury powietrza pod koronami drzew, w zimie zaś – temperatura powietrza w liściastych zbiorowiskach leśnych jest prawie taka jak w terenie otwartym.
- Największe dobowe amplitudy temperatura powietrza w Puszczy Boreckiej są na wysokości 5,0 m nad poziomem gruntu, a nie przy powierzchni gruntu (jak w terenie otwartym). Na poziomie 5,0 m występują też największe różnice między średnimi dobowymi przebiegami temperatury w dni o odmiennych warunkach baryczno-radiacyjnych.
- Różnice temperatury powietrza między wnętrzem lasu i terenem otaczającym (w cyklach dobowym i rocznym) są największe w godzinach przedpołudniowych w lecie. Są one największe na wysokości 0,25 m nad poziomem gruntu.
- Wilgotność bezwzględna powietrza na wysokościach 0,25 i 5,0 m nad poziomem gruntu jest większa niż na poziomie 2,0 m.
- Sumy dobowe promieniowania słonecznego w każdej porze roku najbardziej wpływają na różnice temperatury powietrza między zbiorowiskami leśnymi i terenem otwartym.
- Różnice wilgotności bezwzględnej powietrza między Puszczą Borecką i terenem otwartym najbardziej zależą: wiosną i w lecie – od dobowych sum promieniowania słonecznego, jesienią – od ciśnienie atmosferycznego, w zimie – od dobowych sum promieniowania słonecznego i wskaźnika NAO, a średnio w roku – od wskaźnik NAO.