

# BILANS CIEPLNY LASU IGLASTEGO W LATACH O EKSTREMALNYCH OPADACH I JEGO WIELOLETNIE ZMIANY W REJONIE BYDGOSZCZY I WROCŁAWIA

**Joanna BUBNOWSKA<sup>1)</sup>, Edward GAŚIOREK<sup>1)</sup>,  
Leszek ŁABĘDZKI<sup>2)</sup>, Elżbieta MUSIAŁ<sup>1)</sup>, Marian S. ROJEK<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Katedra Matematyki

<sup>2)</sup> Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy  
w Bydgoszczy

<sup>3)</sup> Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska

*Słowa kluczowe: bilans cieplny powierzchni czynnej, ciepło glebowe, ciepło jawne, ciepło utajone,  
faza rozwojowa roślin, las iglasty, saldo promieniowania*

## Streszczenie

Zmiany klimatu, szczególnie widoczne w ostatnich dekadach XX w., mają duży wpływ na działalność gospodarczą człowieka. Bilans cieplny powierzchni czynnej jest jednym z czynników wpływających na ostateczny stan klimatu. Wpływ ten jest również widoczny w przebiegu zmian poszczególnych składowych bilansu cieplnego lasu iglastego. W pracy przedstawiono badania nad zmianami składowych bilansu cieplnego lasu iglastego w okresie wegetacyjnym tego ekosystemu (III–X), w latach o maksymalnych i minimalnych sumach opadów, na przykładzie Wrocławia (w wieloleciu 1964–2000) oraz Bydgoszczy (w wieloleciu 1945–2003).

## WSTĘP

Las pełni szczególną rolę w ogólnym bilansie cieplnym i wodnym naszej planety [STERWART, THOM, 1973]. Powierzchnia lasów ma mniejsze albedo niż powierzchnia gleby, dlatego unicestwienie lasów zmniejsza saldo promieniowania,

---

Adres do korespondencji: dr hab. E. Musiał, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Katedra Matematyki,  
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław; tel. +48 (71) 320-56-59 e-mail: musial@ozi.ar.wroc.pl

czyli ilość energii użytecznej dla ekosystemu, która może być wykorzystana na ewapotranspirację, ogrzewanie atmosfery oraz inne procesy fizyczne i biologiczne.

Powierzchnia ziemi pokryta lasami wykorzystuje na ewapotranspirację od 80 do 90% salda promieniowania, a na ogrzewanie powietrza tylko od 10 do 15%. Taki rozdział energii powoduje w rezultacie słabe prądy konwekcyjne nad lasami, prowadzące do powstania chmur o dużej rozciągłości poziomej i małej rozciągłości pionowej. Chmury te dają opady trwające dłużej, ale o mniejszym natężeniu. Woda z tych opadów w większości wsiąka w glebę, poprawiając stan retencji glebowej i zapewnia trwałość procesu intensywnej ewapotranspiracji. Sytuacja taka jest optymalna z punktu widzenia równowagi termodynamicznej systemu planeta – atmosfera.

Wycinanie lasów powoduje znaczną zmianę struktury bilansu cieplnego, co w rezultacie prowadzi do zmiany struktury bilansu wodnego. W tej sytuacji większa część energii słonecznej jest zużywana na ogrzewanie powietrza, powodując intensywne, pionowe ruchy atmosfery, prowadzące do rozbudowy chmur burzowych. Efektem wylesienia jest zmniejszenie się ogólnej sumy opadów i występowanie deszczów krótkotrwałych, o charakterze ulewy. Woda spływa szybko po powierzchni gleby erodując jej górną, urodzajną warstwę, co w rezultacie utrudnia powtórne zalesienie zdegradowanych obszarów [KĘDZIORA, 1999].

W ostatnich kilku dziesiątkach lat także skład chemiczny atmosfery, w wyniku działalności człowieka, ulega zmianom. Zmiany te są tak szybkie, że naturalne mechanizmy przyrody nie są w stanie ich zneutralizować. Polegają one głównie na zwiększeniu zawartości CO<sub>2</sub> oraz innych gazów, głównie metanu i tlenków azotu, działających podobnie jak CO<sub>2</sub> w atmosferze oraz zmniejszeniu ilości ozonu w stratosferze. Zmiany zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze powodują zmiany bilansu promieniowania, a te z kolei wywołują zmiany systemu, którego ten bilans jest kluczowym elementem [RYSZKOWSKI, KĘDZIORA, 1993; 1995].

Chociaż wielu badaczy uważa, że zachodzące zmiany mieszczą się ciągle w obszarze stabilności obecnego stanu równowagi układu planeta – atmosfera, to jednak nałożenie się wielu zjawisk sprawia, że pojawienie się dużych zmian klimatycznych jest prawdopodobne. W naszej strefie klimatycznej należy spodziewać się zmian w strukturze bilansu cieplnego powierzchni czynnej wyrażających się zwiększeniem strumienia ciepła odczuwalnego kosztem strumienia ciepła utajonego [MUSIAŁ, 2001].

Polska należy do krajów o najmniej korzystnym bilansie wodnym w Europie, dlatego uzyskanie odpowiedniej ilości wody do produkcji roślinnej jest podstawą dalszego rozwoju gospodarczego naszego kraju. Las odgrywa tutaj rolę szczególną, ponieważ szata roślinna może być narzędziem kształtowania struktury bilansu cieplnego w krajobrazie rolniczym, a co za tym idzie, struktury bilansu wodnego tego krajobrazu. Ponadto lasy, dzięki głębokiemu systemowi korzeniowemu, korzystają z zapasów wody znajdujących się w głębszych warstwach gleby, nie zabierając w ten sposób wody roślinom rosnącym w sąsiedztwie.

## METODY BADAŃ

Badania zmienności bilansu cieplnego lasów iglastych przeprowadzono na podstawie pomiarów parametrów meteorologicznych wykonanych w Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii AR Wrocław-Swojec (1964–2000) oraz w obserwatorium w Bydgoszczy (1945–2003).

Saldo promieniowania oraz inne składniki bilansu cieplnego wyznaczono za pomocą modelu BMC [KĘDZIORA, 1999; KĘDZIORA, OLEJNIK, KAPUŚCIŃSKI, 1989; OLEJNIK, KĘDZIORA, 1991; OLEJNIK, 1996; KAPUŚCIŃSKI, 2000]. Wymaga to znajomości temperatury powietrza ( $^{\circ}\text{C}$ ), prędkości wiatru ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) i ciśnienia pary wodnej (hPa) na poziomie pomiarowym 2 m nad powierzchnią parującą oraz usłonecznienia rzeczywistego (h).

Wyznaczając saldo promieniowania  $Rn$ , uwzględniono dodatkowo dekadową sumę wartości usłonecznienia astronomicznie możliwego (h) oraz średnią z dekady sumę dzienną promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery ( $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ). Wartości obu tych parametrów są stabelaryzowane.

Aktualne warunki meteorologiczne danego terenu charakteryzuje struktura bilansu cieplnego powierzchni czynnej. Zgodnie z prawem zachowania energii bilans cieplny powierzchni czynnej można przedstawić za pomocą równania:

$$Rn + LE + S + G = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- $Rn$  – saldo promieniowania,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;
- $LE$  – gęstość strumienia ciepła utajonego,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;
- $S$  – gęstość strumienia ciepła odczuwalnego,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;
- $G$  – gęstość strumienia ciepła glebowego,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Z ogólnej ilości energii, która dochodzi do powierzchni czynnej (saldo promieniowania) część jest przeznaczona na parowanie (ciepło utajone), a część na ogrzanie atmosfery (ciepło odczuwalne) oraz gleby (ciepło glebowe). Wymienione strumienie ciepła nie są niezależne. Niektóre z nich decydują o tym, jakie wartości przyjmą inne. W przyrodzie obserwuje się zasadę priorytetu parowania [KĘDZIORA, 1999], zgodnie z którą dostarczona energia najpierw pokrywa potrzeby procesu parowania, a potem dopiero ogrzewa powietrze i glebę. W przypadku, gdy ilość energii jest za mała, następuje odwrócenie kierunku przepływu ciepła odczuwalnego oraz glebowego, które zamiast płynąć od powierzchni czynnej ku atmosferze i w głąb gleby, płyną z głębi gleby i z wyższych warstw atmosfery do silnie parującej powierzchni czynnej.

Najważniejszą wielkością charakteryzującą warunki energetyczne środowiska przyrodniczego jest saldo promieniowania  $Rn$  określające ilość energii użytecznej dla ekosystemu. Wartości salda promieniowania można oszacować za pomocą następującego wzoru [KĘDZIORA, 1999]:

$$Rn = (1 - \alpha)R_0(0,22 + 0,54u) - \sigma T_a^4(0,56 - 0,08\sqrt{e_a})(0,1 + 0,9u) \quad (2)$$

gdzie:

- $R_0$  – promieniowanie na górnej granicy atmosfery,  $W \cdot m^{-2}$ ;
- $T_a$  – temperatura powietrza na poziomie pomiarowym w skali bezwzględnej, K;
- $u$  – usłonecznienie względne;
- $e_a$  – ciśnienie pary wodnej na poziomie pomiarowym, hPa;
- $\sigma$  – stała Stefana–Boltzmana ( $5,58 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ );
- $\alpha$  – albedo.

Gęstość strumienia ciepła glebowego wyznacza się następująco:

$$G = -0,2Rn(1 - 0,75f) \left[ \sin \frac{\pi}{6}(i - 2) \right] \quad (3)$$

gdzie:

- $f$  – wskaźnik fazy rozwojowej roślin;
- $i$  – numer miesiąca w roku.

Wskaźnik fazy rozwojowej rośliny  $f$  [KARLIŃSKI, KĘDZIORA, 1968] jest liczbowym opisem jej aktywności biologicznej w sezonie wegetacyjnym. Wartościami fazy rozwojowej są liczby należące do przedziału  $(0; 1)$ . Wartości te określają stopień rozwoju rośliny w danym momencie sezonu wegetacyjnego. Wartość wskaźnika fazy równa 0 oznacza, że w rozpatrywanym ekosystemie nie rozpoczął się, bądź też skończył już okres aktywności biologicznej. Wartość wskaźnika fazy równa 1 oznacza, że ekosystem znajduje się w maksymalnym stadium rozwoju. Przykładowo średnie miesięczne wartości wskaźników faz rozwojowych lasu iglastego w poszczególnych miesiącach są następujące [OLEJNIK, 1996]: 0,3 – w marcu, 0,56 – w kwietniu, 1 – w maju, czerwcu, lipcu, sierpniu i wrześniu i 0,4 – w październiku.

Jednym ze sposobów liczbowego ujęcia zależności między dwoma głównymi strumieniami ciepła – strumieniem ciepła odczuwalnego i strumieniem ciepła utajonego jest zaproponowany przez Bowena współczynnik, będący ich ilorazem:

$$\beta = \frac{S}{LE} = \gamma \frac{K_s}{K_v} \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial e}{\partial z}} \quad (4)$$

gdzie:

- $K_S, K_V$  – odpowiednio współczynniki turbulencyjnej wymiany ciepła i pary wodnej;  
 $\gamma$  – stała psychrometryczna ( $\gamma = 0,655 \text{ hPa}\cdot\text{K}^{-1}$ );  
 $T$  – temperatura powietrza, °C;  
 $e$  – ciśnienie pary wodnej, hPa;  
 $z$  – wysokość pomiarowa, m.

Kędziora i Olejnik [KĘDZIORA, 1999; KĘDZIORA, OLEJNIK, KAPUŚCIŃSKI, 1989; OLEJNIK, KĘDZIORA, 1991; OLEJNIK, 1996] określili związek między wartością współczynnika Bowena, a niektórymi elementami meteorologicznymi i fazą rozwojową roślin:

$$\beta = \frac{12,75}{\frac{100(d\sqrt{v})^{\arctg(\frac{\pi}{2}f)}}{t(u+0,4)} + 3,7} - 0,02 \quad (5)$$

gdzie:

- $d$  – niedosyt wilgotności powietrza, hPa;  
 $v$  – prędkość wiatru na wysokości pomiarowej,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  
 $t$  – temperatura powietrza na wysokości pomiarowej, °C;  
 $u$  – usłonecznienie względne;  
 $f$  – wskaźnik fazy rozwojowej roślin.

Znając wartość współczynnika Bowena oraz gęstość strumienia ciepła globalnego, po przekształceniu równania (1), można obliczyć wartość gęstości strumienia ciepła utajonego  $LE$ :

$$LE = -\frac{Rn + G}{(1 + \beta)} \quad (6)$$

Znając  $Rn$ ,  $LE$  oraz  $G$ , z równana (1) można wyznaczyć gęstość strumienia ciepła odczuwalnego  $S$ :

$$S = -(Rn - LE - G) \quad (7)$$

W naszej strefie klimatycznej można oczekiwać zmian w strukturze bilansu cieplnego polegających na zwiększeniu strumienia ciepła odczuwalnego kosztem strumienia ciepła utajonego, czyli tendencji wzrostowej współczynnika Bowena [MUSIAŁ, 2001], czego konsekwencją jest wzrost temperatury powietrza.

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Pierwszym etapem badań była analiza składowych bilansu cieplnego lasów iglastych w latach o maksymalnych i minimalnych sumach opadów na przykładzie dwóch regionów Polski – Bydgoszczy (tab. 1, 2) i Wrocławia (tab. 3, 4).

Rokiem o największej w wieloleciu 1945-2003 sumie opadów był w Bydgoszczy rok 1980. W roku tym spadło 809 mm deszczu, a w okresie wegetacyjnym lasu (III–X) – 717,9 mm (tab. 1). Suma opadów w sezonie wegetacyjnym była o 85% wyższa od średniej z wielolecia równej 387,3 mm. Bardzo dobre warunki wilgotnościowe w tym roku widoczne są w strukturze bilansu cieplnego. Ciepło utajone stanowiło w tym roku od 65 do 87% salda promieniowania, a ciepło odczuwalne to średnio 17%  $R_n$ . Udział tych składników jest zgodny z zasadą priorytetu parowania.

Rokiem o najmniejszej w wieloleciu rocznej sumie opadu wynoszącej 268,3 mm w Bydgoszczy był 1989 r. W sezonie wegetacyjnym lasu (III–X) spadło w tym roku 175,9 mm deszczu (tab. 2). Było to 45% średniej z wielolecia sumy opadów dla tego okresu, wynoszącej 387,3 mm. Znalazło to odbicie w strukturze bilansu cieplnego. W porównaniu z 1980 r. znacznie zmniejszył się udział ciepła utajonego, a zwiększył – ciepła odczuwalnego, przeznaczonego na ogrzanie atmosfery.

Analiza zmienności składowych bilansu cieplnego we Wrocławiu (tab. 3, 4) w latach o ekstremalnych sumach opadów w wieloleciu 1964–2000 wykazała podobne prawidłowości jak w przypadku Bydgoszczy.

W celu scharakteryzowania zmian bilansu cieplnego w wieloleciu, dla każdego roku w ciągu obserwacyjnym wyznaczono średnie z sezonu wegetacyjnego lasu iglastego (III–X) wartości elementów bilansu cieplnego (rys. 1–4).

Niemal we wszystkich latach analizowanych okresów wieloletnich gęstość strumienia ciepła odczuwalnego w Bydgoszczy osiąga większe wartości niż we Wrocławiu (rys. 1). Jest to niewątpliwie efektem większej ewapotranspiracji we Wrocławiu i związanych z tym większych wartości ciepła utajonego.

Stosunek gęstości strumienia ciepła utajonego do salda promieniowania (w kolejnych latach analizowanego okresu) ma tendencję spadkową w obu regionach (rys. 2). Wraz ze zmniejszaniem się gęstości strumienia ciepła utajonego, zgodnie z zasadą priorytetu parowania, należy oczekiwać zwiększenia się gęstości strumienia ciepła przeznaczonego na ogrzewanie atmosfery, czyli wzrostu temperatury powietrza [TREPIŃSKA, 1997; MUSIAŁ, GAŚIOREK, ROJEK, 2004].

Stosunek gęstości strumienia ciepła odczuwalnego do salda promieniowania w kolejnych latach analizowanego okresu w obu regionach wykazuje tendencje wzrostowe (rys. 3).

Konsekwencją zmian strumieni ciepła odczuwalnego (rys. 1, 3) i utajonego (rys. 2) są zmiany współczynnika Bowena (rys. 4). W obu badanych rejonach współczynnik ten wykazuje tendencje wzrostowe. Jego wyraźnie większa wartość w Bydgoszczy oznacza, że w tym regionie ilość ciepła odczuwalnego przeznaczonego na ogrzanie atmosfery była większa.

**Tabela 3.** Składowe bilansu cieplnego lasu iglastego w roku o najwyższych opadach (1986) we Wrocławiu–Swojcu

**Table 3.** Components of heat balance for coniferous forest in the year with the highest precipitation (1986) in Wrocław–Swojec

Miesiąc Month	Dekada Ten-days	Rn	LE	G	S	LE/Rn	S/Rn	G/Rn	S/LE	P	P <sub>o</sub>
III	1	47,82	47,93	3,78	-3,89	1,00	-0,08	0,08	-0,08	3,0	7,4
	2	39,09	32,36	3,09	3,65	0,83	0,09	0,08	0,11	1,8	9,3
	3	37,55	28,09	2,97	6,49	0,75	0,17	0,08	0,23	25,4	12,6
IV	1	62,97	42,01	8,03	12,93	0,67	0,21	0,13	0,31	8,2	12,0
	2	72,64	58,22	7,27	7,15	0,80	0,10	0,10	0,12	13,4	13,5
	3	97,06	73,80	6,28	16,97	0,76	0,17	0,06	0,23	1,2	13,3
V	1	125,04	105,75	6,58	12,72	0,85	0,10	0,05	0,12	6,2	18,7
	2	119,05	94,95	5,95	18,15	0,80	0,15	0,05	0,19	50,9	16,3
	3	122,89	95,29	6,14	21,46	0,78	0,17	0,05	0,23	35,5	21,8
VI	1	113,68	93,28	4,92	15,47	0,82	0,14	0,04	0,17	67,3	18,9
	2	141,79	113,53	6,14	22,12	0,80	0,16	0,04	0,19	20,8	28,6
	3	151,35	127,52	6,55	17,27	0,84	0,11	0,04	0,14	2,3	25,3
VII	1	134,44	112,48	3,36	18,60	0,84	0,14	0,02	0,17	63,6	31,4
	2	118,20	100,27	2,96	14,97	0,85	0,13	0,02	0,15	24,9	30,0
	3	128,69	104,94	3,22	20,53	0,82	0,16	0,02	0,20	35,2	24,3
VIII	1	129,86	107,32	0	22,54	0,83	0,17	0	0,21	19,8	28,4
	2	89,31	71,63	0	17,68	0,80	0,20	0	0,25	83,9	19,0
	3	76,39	62,31	0	14,09	0,82	0,18	0	0,23	47,1	24,8
IX	1	64,71	58,01	-1,62	8,31	0,90	0,13	-0,03	0,14	22,2	16,1
	2	56,01	43,59	-1,40	13,82	0,78	0,25	-0,03	0,32	30,5	16,3
	3	43,53	36,85	-1,47	8,15	0,85	0,19	-0,03	0,22	3,2	14,0
X	1	13,59	11,81	-1,26	3,04	0,87	0,22	-0,09	0,26	10,0	10,4
	2	7,57	6,39	-0,93	2,11	0,84	0,28	-0,12	0,33	13,0	13,2
	3	18,48	16,70	-2,48	4,25	0,90	0,23	-0,13	0,25	23,2	14,5
Suma – sum		2011,72	1645,06	68,08	298,58	–	–	–	–	600,6	440,1

Oznaczenia jak w tabeli 1. Explanation as in tab. 1.

**Tabela 2.** Składowe bilansu cieplnego lasu iglastego w roku o najniższych opadach (1989) w Bydgoszczy  
**Table 2.** Components of heat balance for coniferous forest in the year with the lowest precipitation (1989) in Bydgoszcz

Miesiąc Month	Dekada Ten-days	Rn	LE	G	S	LE/Rn	S/Rn	G/Rn	S/LE	P	P <sub>o</sub>
III	1	36,21	27,46	2,86	5,89	0,76	0,16	0,08	0,21	8,4	8,7
	2	35,82	25,82	2,83	7,17	0,72	0,20	0,08	0,28	11,4	9,5
	3	35,09	24,43	2,77	7,89	0,70	0,22	0,08	0,32	7,3	9,9
IV	1	57,91	41,84	7,39	8,68	0,72	0,15	0,13	0,21	7,4	9,7
	2	65,94	51,37	6,60	7,97	0,78	0,12	0,10	0,16	0,2	9,2
	3	82,43	65,39	5,34	11,71	0,79	0,14	0,06	0,18	9,5	11,4
V	1	113,70	81,96	5,98	25,76	0,72	0,23	0,05	0,31	2,6	15,7
	2	119,08	95,03	5,95	18,09	0,80	0,15	0,05	0,19	6,0	17,8
	3	135,61	113,22	6,78	15,61	0,83	0,12	0,05	0,14	0,3	15,4
VI	1	112,31	89,98	4,86	17,47	0,80	0,16	0,04	0,19	6,3	17,2
	2	123,20	104,26	5,33	13,61	0,85	0,11	0,04	0,13	7,8	20,8
	3	127,98	107,72	5,54	14,71	0,84	0,11	0,04	0,14	4,1	20,3
VII	1	132,97	115,22	3,32	14,42	0,87	0,11	0,02	0,13	0,9	24,2
	2	118,98	103,39	2,97	12,62	0,87	0,11	0,02	0,12	14,8	30,4
	3	125,05	105,97	3,13	15,96	0,85	0,13	0,02	0,15	4,2	28,0
VIII	1	102,69	83,85	0	18,85	0,82	0,18	0	0,22	14,9	18,9
	2	107,20	90,06	0	17,14	0,84	0,16	0	0,19	0	18,3
	3	78,68	66,94	0	11,74	0,85	0,15	0	0,18	20,1	22,7
IX	1	70,93	56,50	-1,77	16,20	0,80	0,23	-0,03	0,29	0	15,5
	2	57,46	42,55	-1,44	16,35	0,74	0,28	-0,03	0,38	8,0	16,6
	3	43,95	33,98	-1,48	11,45	0,77	0,26	-0,03	0,34	5,9	12,1
X	1	15,80	12,54	-1,46	4,72	0,79	0,30	-0,09	0,38	11,3	11,3
	2	20,64	16,15	-2,54	7,03	0,78	0,34	-0,12	0,44	8,0	10,7
	3	16,56	10,72	-2,22	8,06	0,65	0,49	-0,13	0,75	16,5	13,0
Suma – sum		1936,19	1566,35	60,74	309,10	–	–	–	–	175,9	387,3

Oznaczenia jak w tabeli 1. Explanations as in tab. 1.



**Tabela 1.** Składowe bilansu cieplnego lasu iglastego w roku o najwyższych opadach (1980) w Bydgoszczy

**Table 1.** Components of heat balance for coniferous forest in the year with the highest precipitation (1980) in Bydgoszcz

Miesiąc Month	Dekada Ten-days	$R_n$	$LE$	$G$	$S$	$LE/R_n$	$S/R_n$	$G/R_n$	$S/LE$	$P$	$P_o$
III	1	58,78	56,12	4,64	-1,98	0,95	-0,03	0,08	-0,04	13,2	8,7
	2	64,97	63,12	5,13	-3,28	0,97	-0,05	0,08	-0,05	0	9,5
	3	37,67	31,05	2,98	3,64	0,82	0,10	0,08	0,12	5,5	9,9
IV	1	55,08	41,36	7,03	6,70	0,75	0,12	0,13	0,16	7,0	9,7
	2	76,70	56,42	7,67	12,61	0,74	0,16	0,10	0,22	4,9	9,2
	3	75,85	61,66	4,91	9,28	0,81	0,12	0,06	0,15	21,5	11,4
V	1	99,75	82,58	5,25	11,93	0,83	0,12	0,05	0,14	11,7	15,7
	2	122,73	103,75	6,14	12,84	0,85	0,10	0,05	0,12	0,5	17,8
	3	105,68	90,62	5,28	9,77	0,86	0,09	0,05	0,11	12,7	15,4
VI	1	130,49	107,98	5,65	16,86	0,83	0,13	0,04	0,16	68,1	17,2
	2	110,23	88,41	4,77	17,04	0,80	0,15	0,04	0,19	189,7	20,8
	3	112,10	88,69	4,85	18,55	0,79	0,17	0,04	0,21	58,7	20,3
VII	1	96,47	74,39	2,41	19,66	0,77	0,20	0,02	0,26	109,3	24,2
	2	99,47	84,74	2,49	12,24	0,85	0,12	0,02	0,14	65,8	30,4
	3	99,79	81,37	2,49	15,92	0,82	0,16	0,02	0,20	17,2	28,0
VIII	1	106,64	90,94	0	15,70	0,85	0,15	0	0,17	1,3	18,9
	2	103,30	80,00	0	23,30	0,77	0,23	0	0,29	4,3	18,3
	3	70,47	60,33	0	10,14	0,86	0,14	0	0,17	26,4	22,7
IX	1	70,93	57,12	-1,77	15,58	0,81	0,22	-0,03	0,27	3,5	15,5
	2	55,94	46,25	-1,40	11,09	0,83	0,20	-0,03	0,24	34,5	16,6
	3	42,81	28,06	-1,45	16,19	0,66	0,38	-0,03	0,58	13,8	12,1
X	1	16,18	14,13	-1,50	3,55	0,87	0,22	-0,09	0,25	11,8	11,3
	2	17,70	14,90	-2,18	4,98	0,84	0,28	-0,12	0,33	15,1	10,7
	3	16,27	14,20	-2,18	4,25	0,87	0,26	-0,13	0,30	21,4	13,0
Suma – sum		1845,96	1518,19	61,21	266,56	–	–	–	–	717,9	387,3

Oznaczenia:  $R_n$  – saldo promieniowania ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $LE$  – gęstość strumienia ciepła utajonego ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $G$  – gęstość strumienia ciepła glebowego ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $S$  – gęstość strumienia ciepła odczuwalnego ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $P$  – suma opadów (mm),  $P_o$  – średnia z wieloletnia z wieloletnia suma opadów (mm).

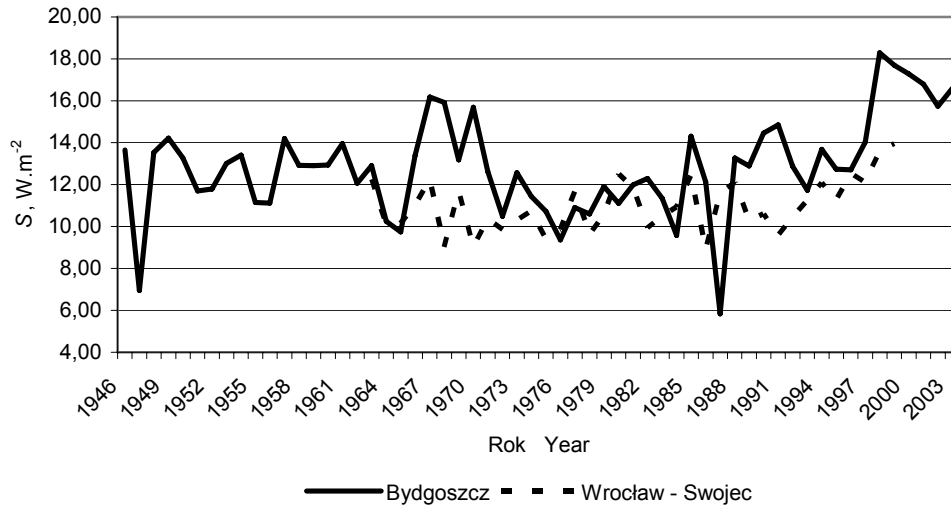
Explanations:  $R_n$  – net radiation ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $LE$  – latent heat flux ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $G$  – soil heat flux ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $S$  – sensible heat flux ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $P$  – sum of precipitation (mm),  $P_o$  – long-term precipitation (mm).

**Tabela 4.** Składowe bilansu cieplnego lasu iglastego w roku o najniższych opadach (1992) we Wrocławiu–Swojcu

**Table 4.** Components of heat balance for coniferous forest in the year with the lowest precipitation (1992) in Wrocław–Swojiec

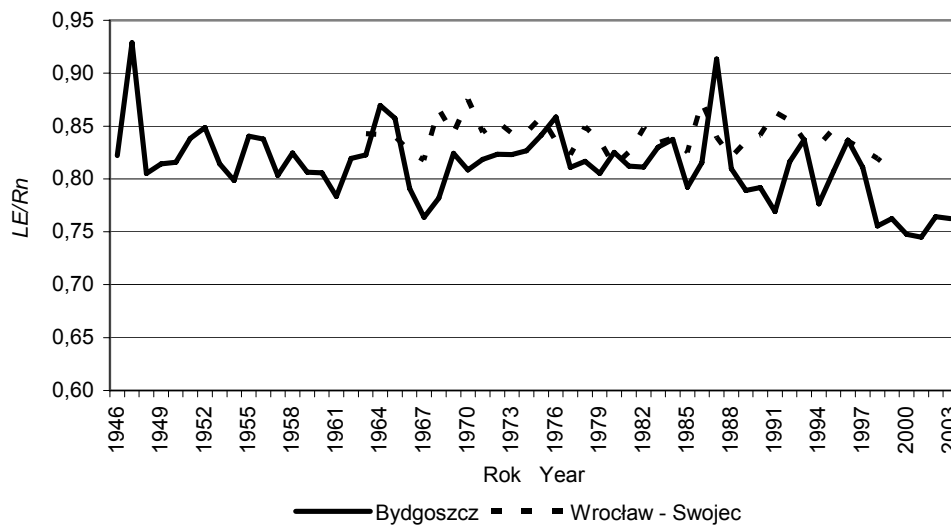
Miesiąc Month	Dekada Ten-days	Rn	LE	G	S	LE/Rn	S/Rn	G/Rn	S/LE	P	P <sub>o</sub>
III	1	36,19	27,50	2,86	5,83	0,76	0,16	0,08	0,21	4,3	7,4
	2	37,62	31,43	2,97	3,22	0,84	0,09	0,08	0,10	28,4	9,3
	3	38,04	30,96	3,01	4,07	0,81	0,11	0,08	0,13	41,8	12,6
IV	1	58,77	43,02	7,50	8,25	0,73	0,14	0,13	0,19	7,9	12,0
	2	65,80	53,88	6,58	5,34	0,82	0,08	0,10	0,10	2,2	13,5
	3	84,68	70,44	5,48	8,76	0,83	0,10	0,06	0,12	5,9	13,3
V	1	99,64	84,29	5,24	10,11	0,85	0,10	0,05	0,12	8,4	18,7
	2	127,70	107,80	6,39	13,52	0,84	0,11	0,05	0,13	7,0	16,3
	3	136,75	117,33	6,84	12,58	0,86	0,09	0,05	0,11	0,1	21,8
VI	1	140,16	122,50	6,07	11,59	0,87	0,08	0,04	0,09	3,7	18,9
	2	125,76	106,74	5,45	13,57	0,85	0,11	0,04	0,13	36,9	28,6
	3	154,61	127,82	6,69	20,10	0,83	0,13	0,04	0,16	1,8	25,3
VII	1	138,44	118,55	3,46	16,42	0,86	0,12	0,02	0,14	20,7	31,4
	2	130,38	112,39	3,26	14,73	0,86	0,11	0,02	0,13	8,4	30,0
	3	142,30	124,24	3,56	14,50	0,87	0,10	0,02	0,12	0,4	24,3
VIII	1	137,15	120,92	0	16,23	0,88	0,12	0	0,13	30,9	28,4
	2	102,69	90,53	0	12,16	0,88	0,12	0	0,13	21,0	19,0
	3	101,58	89,05	0	12,53	0,88	0,12	0	0,14	5,7	24,8
IX	1	64,89	60,97	-1,62	5,54	0,94	0,09	-0,03	0,09	8,7	16,1
	2	56,52	49,95	-1,41	7,98	0,88	0,14	-0,03	0,16	9,6	16,3
	3	44,44	39,54	-1,50	6,40	0,89	0,14	-0,03	0,16	18,3	14,0
X	1	15,75	14,76	-1,46	2,45	0,94	0,16	-0,09	0,17	0,8	10,4
	2	10,40	10,14	-1,28	1,54	0,97	0,15	-0,12	0,15	7,9	13,2
	3	20,37	19,99	-2,73	3,11	0,98	0,15	-0,13	0,16	19,9	14,5
Suma – sum		2070,63	1774,74	65,36	230,53	–	–	–	–	300,7	440,1

Oznaczenia jak w tabeli 1. Explanation as in tab. 1.



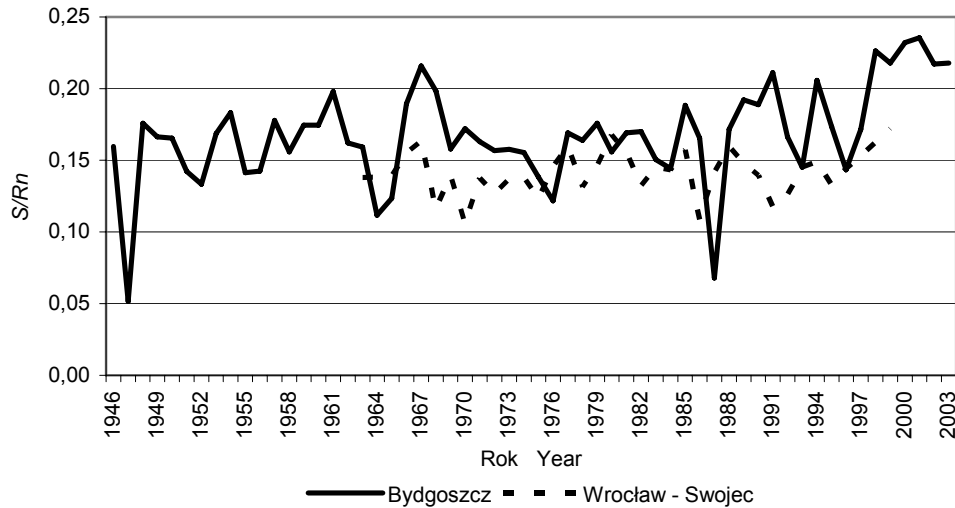
Rys. 1. Zmiany średnich wartości gęstości strumienia ciepła odczuwalnego  $S$  sezonu wegetacyjnego lasu iglastego: Wrocław–Swojec (1964–2000), Bydgoszcz (1945–2003)

Fig. 1. Variation of mean sensible heat fluxes  $S$  during the growing season in coniferous forest in Wrocław–Swojec (1964–2000) and in Bydgoszcz (1945–2003)



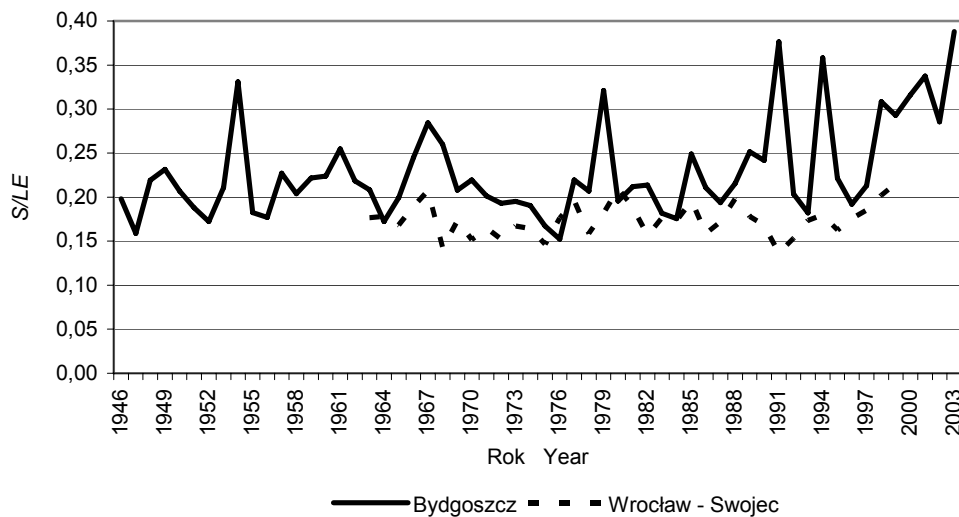
Rys. 2. Zmiany średnich wartości ilorazów gęstości strumienia ciepła utajonego  $LE$  i salda promieniowania  $Rn$  w sezonie wegetacyjnym lasu iglastego: Wrocław–Swojec (1964–2000), Bydgoszcz (1945–2003)

Fig. 2. Variation of the quotient of latent heat flux  $LE$  and net radiation  $Rn$  during the growing season in coniferous forest in Wrocław–Swojec (1964–2000) and in Bydgoszcz (1945–2003)



Rys. 3. Zmiany średnich wartości ilorazów gęstości strumienia ciepła odczuwalnego  $S$  i salda promieniowania  $Rn$  w sezonie wegetacyjnym lasu iglastego: Wrocław–Swojec (1964–2000), Bydgoszcz (1945–2003)

Fig. 3. Variation of the quotient of sensible heat flux  $S$  and net radiation  $Rn$  during the growing season in coniferous forest in Wrocław–Swojec (1964–2000) and in Bydgoszcz (1945–2003)



Rys. 4. Zmiany średnich wartości współczynnika Bowena ( $S/LE$ ) w sezonie wegetacyjnym lasu iglastego; Wrocław–Swojec (1964–2000), Bydgoszcz (1945–2003)

Fig. 4. Variation of the Bowen's ratio ( $S/LE$ ) during the growing season in coniferous forest in Wrocław–Swojec (1964–2000) and in Bydgoszcz (1945–2003)

## WNIOSKI

Na podstawie analizy składowych bilansu cieplnego lasu iglastego w latach o ekstremalnych sumach opadów wykazano wyraźne zwiększenie wartości stosunku strumienia ciepła utajonego do salda promieniowania w warunkach wzmożonej ewapotranspiracji spowodowanej dużymi opadami i zmniejszenie wartości tego stosunku w latach suchych.

W rozpatrywanym wieloleciu, w obu regionach, stwierdzono zwiększanie się strumienia ciepła odczuwalnego i powolne zmniejszanie się strumienia ciepła utajonego w okresie wegetacyjnym lasu iglastego (III–X).

Na podstawie zmian analizowanych składowych bilansu cieplnego i współczynnika Bowena w okresach wieloletnich, można przypuszczać, że zarówno w rejonie Wrocławia, jak i Bydgoszczy, należy oczekiwać wzrostu temperatury powietrza ze względu na systematyczny wzrost strumienia ciepła odczuwalnego.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004–2007 jako projekt badawczy.

## LITERATURA

- KAPUŚCIŃSKI J., 2000. Struktura bilansu cieplnego powierzchni czynnej na tle warunków klimatycznych środkowozachodniej Polski. *Rocz. Nauk. AR Pozn. Rozpr. Nauk. z.* 303 ss. 250.
- KARLIŃSKI M., KĘDZIORA A., 1968. Rozważania metodyczne przy układaniu kalendarza przyrody dla województwa szczecińskiego. *Pr. Kom. Nauk Rol. Kom. Nauk Leśn. PTPN* 24 s. 159–175.
- KĘDZIORA A., 1999. Podstawy agrometeorologii. Poznań: PWRiL ss. 364.
- KĘDZIORA A., OLEJNIK J., KAPUŚCIŃSKI J., 1989. Impact of landscape structure on heat and water balance. *Ecol. Intern. Bull.* 17 ss. 17.
- OLEJNIK J., KĘDZIORA A., 1991. A model for heat and water balance estimation and its application to land use and climate variation. *Earth Surface Processes Landforms* vol. 16 s. 601–617.
- OLEJNIK J., 1996. Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych. *Rocz. Nauk. AR Pozn. Rozpr. Nauk. z.* 268 ss. 125.
- MUSIAŁ E., 2001. Modelowanie procesu ewapotranspiracji rzeczywistej i prognozowanie jego tendencji. *Zesz. Nauk. AR Wroc. nr 412 Rozpr.* 182 ss. 116.
- MUSIAŁ E., GAŚIOREK E., ROJEK M.S., 2004. Zmienność temperatury powietrza w obserwatorium Wrocław–Swojec w latach 1964–2001. *Acta Agroph.* nr 105 vol. 3(2) s. 333–342.
- RYSZKOWSKI L., KĘDZIORA A., 1995. Modification of the effects of global climate change by plant cover structure in an agricultural landscape. *Geogr. Pol.* vol. 65 s. 5–34.
- RYSZKOWSKI L., KĘDZIORA A., 1993. Rolnictwo a efekt szklarniowy. *Kosmos* nr 42 s. 123–149.
- TREPIŃSKA J., 1997. Wahania klimatu w Krakowie (1792–1995). *Kraków Inst. Geogr. UJ* ss. 204.
- STEWART J. B., THOM A.S., 1973. Energy budgets in pine forest. *Quarter. J. Royal Met. Soc.* vol. 99 no 419 s. 154–170.

*Joanna BUBNOWSKA, Edward GAŚIOREK, Leszek ŁABĘDZKI,  
Elżbieta MUSIAŁ, Marian S. ROJEK*

**HEAT BALANCE OF CONIFEROUS FOREST  
IN YEARS WITH EXTREME PRECIPITATION AND ITS LONG-TERM CHANGES  
IN THE REGIONS OF BYDGOSZCZ AND WROCLAW**

*Key words: coniferous forest, heat balance, latent heat flux, sensible heat flux, soil heat flux*

**S u m m a r y**

Climate changes, particularly visible in the last decades of the XX<sup>th</sup> century have paramount influence on human economic activity.

Heat balance is one of the factors affecting the climate. That impact is noticeable when variations in heat balance components are examined e. g. in coniferous forest. This paper presents analyses of these variations during the growing season (III–X) in the years with maximal and minimal precipitation sums. The study shows also the changes in heat balance components in Wrocław–Swojec in the years 1964–2000 and in Bydgoszcz in the years 1945–2003.

---

**Recenzenci:**

*prof. dr hab. Andrzej Kędziora*

*prof. dr hab. Waclaw Roguski*

Praca wpłynęła do Redakcji 14.03.2005 r.