

## Zmiany klimatu we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964-2000

Climate changes in Wrocław-Swojec  
in the period 1964-2000

Elżbieta Musiał<sup>1</sup>, Joanna Bubnowska<sup>1</sup>, Edward Gąsiorek<sup>1</sup>

**Zarys treści:** Celem prezentowanej pracy jest opis zmienności stosunków wodnych, scharakteryzowanych za pomocą klimatycznego bilansu wodnego, w badanym wieloleciu 1964-2000, oraz stosunków cieplnych w okresie wegetacji, na przykładzie trzech ekosystemów: lasu iglastego, ziemniaków i pszenicy jarej. Wielolecie 1964-2000 we Wrocławiu-Swojcu charakteryzuje się wzrostem ewapotranspiracji potencjalnej i malejącym trendem rocznych sum opadów atmosferycznych. Wyznaczone wartości klimatycznego bilansu wodnego potwierdziły pogłębiający się deficyt opadów na tym terenie. W pracy poddano analizie zmienność wszystkich składowych bilansu cieplnego w okresie wegetacji w odniesieniu do lasu iglastego, ziemniaka oraz pszenicy jarej. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że konsekwencją powiększających się deficytów opadów jest malejący strumień ciepła utajonego odprowadzonego z powierzchni lasów, pszenicy jarej i ziemniaków oraz rosnący strumień ciepła jawnego przeznaczonego na ogrzanie atmosfery. Ostatnim etapem badań były badania dotyczące zmian temperatury w wieloleciu 1964-2000 we Wrocławiu-Swojcu.

**Słowa kluczowe:** opad, ewapotranspiracja potencjalna, bilans cieplny, klimatyczny bilans wodny, ocieplenie klimatu

**Key words:** precipitation, potential evapotranspiration, heat balance, climatic water balance, global warming

### Wstęp

Badania nad zmianami klimatu, jego wahaniami i tendencjami w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat zamieniły się w fascynujące poszukiwania aktualnych trendów klimatycznych, na podstawie których można znaleźć potwierdzenie przypuszczeń o zbliżającej

---

<sup>1</sup> Katedra Matematyki, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław,  
e-mail: musial@ozi.ar.wroc.pl

się zasadniczej zmianie systemu klimatycznego. W literaturze polskiej można znaleźć wiele prac poświęconych tej tematyce (Trepieńska 1997, Lorenc 2000, Kożuchowski 2004, Musiał 2001, *Zmiany i zmienność...* 1999).

## Metodyka

Do literatury pojęcie klimatycznego bilansu wodnego zostało wprowadzone po raz pierwszy przez S. Baca i M. Rojka w 1977 r. (Bac, Rojek 1977, 1979, 1982; Rojek 1994; Rojek, Wiercioch 1994, 1995). Autorzy ci zdefiniowali klimatyczny bilans wodny jako różnicę między opadem a parowaniem wskaźnikowym.

W przedstawianej pracy klimatyczny bilansu wodny (KBW) jest zdefiniowany jako różnica między opadem a ewapotranspiracją potencjalną.

W półroczu chłodnym (październik-marze) miesięczne sumy ewapotranspiracji potencjalnej wyznaczono używając wzoru Tichomirowa  $ETP_T = 0,7d(1,5 + 3v)$  i Iwanowa  $ETP_I = 0,17 (t + 25)^2 \frac{d}{e + d}$  następująco:

$$ETP = (ETP_T + ETP_I) / 2,$$

gdzie:

$t$  – średnia miesięczna temperatura powietrza [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$e$  – średnie miesięczne ciśnienie pary wodnej [hPa],

$d$  – średni miesięczny niedosyt wilgotności [hPa],

$v$  – średnia miesięczna prędkość wiatru [ $\text{ms}^{-1}$ ].

W półroczu ciepłym (kwiecień-wrzesień) miesięczne sumy ewapotranspiracji potencjalnej wyznaczono korzystając ze wzoru Penmana. H.L. Penmann (1948, 1950, 1956, 1963) założył, że gęstość strumienia ciepła utajonego (LE) przeznaczanego na parowanie można wyznaczyć następująco:

$$LE = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \left[ \frac{\Delta}{\gamma} (R_n + G) + E_a \right] = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} (R_n + G) + E_a}{\left( 1 + \frac{\Delta}{\gamma} \right)}$$

gdzie:

$R_n$  – gęstość strumienia salda promieniowania (radiacja netto) [ $\text{Wm}^{-2}$ ],

$G$  – gęstość strumienia ciepła odprowadzonego do gleby [ $\text{Wm}^{-2}$ ],

$E_a$  – zdolność ewaporacyjna powietrza [ $\text{Wm}^{-2}$ ],

$\Delta$  – iloraz różnicowy maksymalnej prężności pary wodnej jako funkcji temperatury,

$\gamma$  – stała psychrometryczna,  $\gamma = 0,655$  [hPaK $^{-1}$ ].

W dobowym przedziale czasowym między strumieniem ciepła utajonego LE a wartością ewapotranspiracji potencjalnej ETP istnieje zależność, która umożliwia zamianę  $\text{Wm}^{-2}$  na mm następująco:  $ETP = n \frac{LE}{28,34}$ , gdzie  $n$  jest długością badanego kroku czasowego.

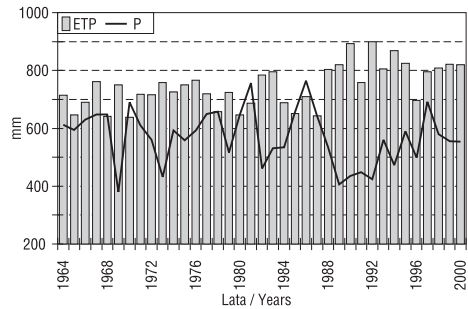
W pracy wyznaczono składowe bilansu cieplnego korzystając z modelu MBC (Kędziora 1999; Olejnik, Kędziora 1991).

Równanie bilansu cieplnego ma postać:  $Rn + LE + H + G = 0$   
gdzie:  $H$  – gęstość strumienia ciepła jawnego [ $Wm^{-2}$ ], pozostałe oznaczenia jak wyżej.

## Wyniki badań i ich dyskusja

Pierwszym etapem badań była analiza zmienności ewapotranspiracji potencjalnej i opadów we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964-2000. Analiza zmienności sum opadowych wykazała malejącą ich tendencję w badanym wieloleciu (ryc. 1, tab. 1). Malejąca tendencja opadów jest szczególnie widoczna w dwóch ostatnich dekadach XX w. W tym okresie opady malały o 36 mm/10 lat, podczas gdy w całym badanym wieloleciu malały średnio o 19 mm/10 lat.

Ewapotranspiracja potencjalna jest interpretowana jako odpowiedź atmosfery na przyjęcie pary wodnej. Badane wielolecie charakteryzowało się wzrostem ewapotranspiracji potencjalnej (ryc. 1 i tab. 1) zarówno w całym wieloleciu (39 mm/10 lat), jak i w dwóch ostatnich dekadach XX w. (69 mm/10 lat). W półroczu chłodnym obserwuje się wolniejszy wzrost ETP, wynoszący w całym wieloleciu 28 mm/10 lat, a w ostatnich dwóch dekadach XX w.



Ryc. 1. Roczne sumy ewapotranspiracji potencjalnej (ETP) i opadów (P) we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964-2000

Fig. 1. Yearly sums of potential evapotranspiration (ETP) and precipitation (P) in Wrocław-Swojce (1964-2000)

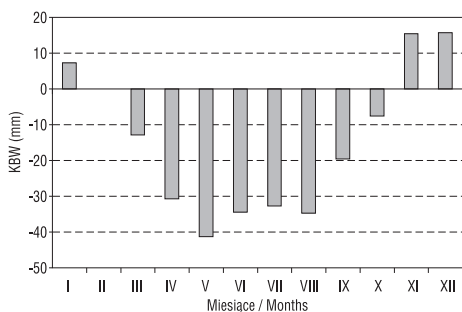
Tab.1. Podstawowe charakterystyki statystyczne opadów i ewapotranspiracji potencjalnej we Wrocławiu-Swojcu w latach 1964-2000

Table 1. Basic statistical characteristics of precipitation and potential evapotranspiration at Wrocław-Swojce Observatory in the period 1964-2000

Rok Years	Okres Period	P mm	$S_p$	Równanie regresji dla P Regression equation for P	Tendencja mm/10 lat Tendency mm /10 year	ETP mm	Równanie regresji dla ETP Regression equation for ETP	Tendencja mm/10 lat Tendency mm /10 year	$S_{ETP}$
1964 - 2000	I-XII X-III	570 200	95 55	$y = -1,9x + 606$ $y = -0,5x + 210$	-19* -5	745 180	$y = 3,9x + 672$ $y = 2,8x + 128$	39** 28**	73 45
1980 - 2000	I-XII X-III	555 196	104 52	$y = -3,6x + 600$ $y = -0,7x + 205$	-36* -7	772 204	$y = 6,9x + 640$ $y = 1,4x + 190$	69** 14**	79 38

P – suma opadów,  $S_p$  – odchylenie standardowe opadów,  $S_{ETP}$  – odchylenie standardowe ewapotranspiracji potencjalnej, ETP – suma ewapotranspiracji potencjalnej \* – statystycznie istotne dla  $\alpha=0,05$ , \*\* – statystycznie istotne dla  $\alpha=0,01$

P – sum of precipitation,  $S_p$  – standard deviation of precipitation,  $S_{ETP}$  – standard deviation of potential evapotranspiration, ETP – sums of potential evapotranspiration \* – statistically significant for  $\alpha=0,05$ , \*\* – statistically significant for  $\alpha=0,01$

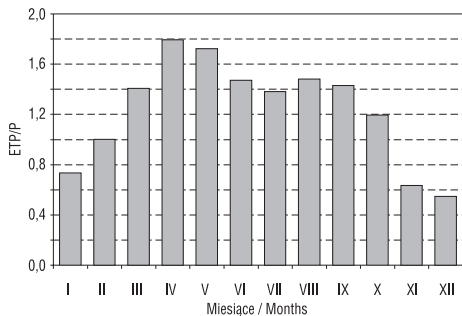


Ryc. 2. Średnie miesięczne sumy klimatycznego bilansu wodnego we Wrocławiu-Swojcu w wieloletniu 1964-2000

Fig. 2. Mean monthly sums of climatic water balance in Wrocław-Swojec (1964-2000)

Średnie roczne wartości ilorazów ETP/P w wieloletniu 1964-2000 mają tendencję rosnącą, co oznacza, że zwiększa się stopień suchości klimatu (ryc. 4).

Klimatyczny bilans wodny poprzez strumień pary wodnej, który transportuje do atmosfery olbrzymie ilości energii, wiąże się z bilansem cieplnym powierzchni czynnej. Składowe bilansu cieplnego nie są niezależne z powodu obowiązującej w przyrodzie zasady priorytetu parowania. Dlatego nadwyżki bądź też deficyty wody, określone przez klimatyczny bilans wodny, na początku okresu wegetacji i w czasie jego trwania decydują o wartościach poszczególnych strumieni bilansu cieplnego.

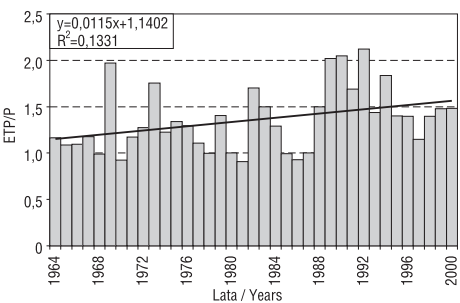


Ryc. 3. Średnie miesięczne wartości ilorazów ewapotranspiracji potencjalnej i opadów (ETP/P) w latach 1964-2000 we Wrocławiu-Swojcu

Fig. 3. Mean monthly values of evapotranspiration/precipitation quotient (ETP/P) in the period 1964-2000 in Wrocław-Swojec

14 mm/10 lat. Badania nad zmianami klimatycznego bilansu wodnego wykazały, że w wieloletniu 1964-2000 wskaźnik ten był ujemny w miesiącach od marca do września, co należy wiązać z faktem, że okres wegetacji w minionym wieloletniu we Wrocławiu-Swojcu charakteryzował się ciągłymi niedoborami opadów (ryc. 2).

Praca zawiera także analizę średnich miesięcznych wartości wskaźnika ETP/P w całym wieloletniu 1964-2000, zwanego „stopniem suchości klimatu” (Kozuchowski 2004). Wskaźnik ten jest większy od jedności (co oznacza przewagę parowania nad opadem) w okresie wiosennym i letnim. Jedynie jesień i zima są okresami retencjonowania wody w glebie (ryc. 3).

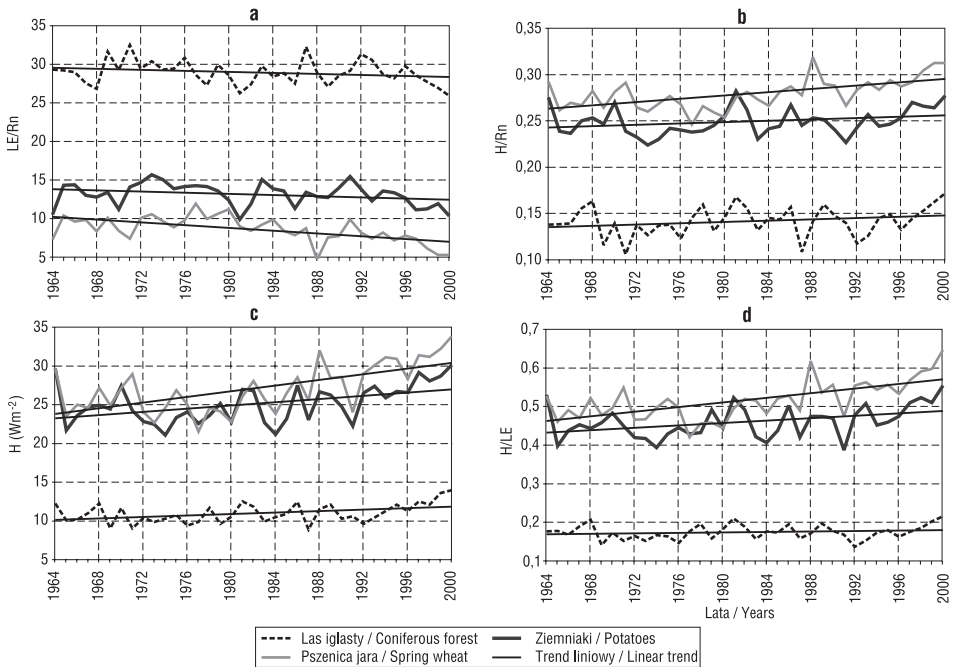


Ryc. 4. Średnie roczne wartości ilorazów ewapotranspiracji potencjalnej i opadów (ETP/P) w latach 1964-2000 we Wrocławiu-Swojcu

Fig. 4. Mean yearly values of evapotranspiration/precipitation quotient (ETP/P) in the period (1964-2000) in Wrocław-Swojec

W pracy poddano analizie zmienność wszystkich składowych bilansu cieplnego w przypadku następujących ekosystemów: lasu iglastego w okresie od marca do października, ziemniaka – od maja do września oraz pszenicy jarej – od kwietnia do sierpnia. Wyniki tych badań znajdują się na rycinie 5.

Analiza bilansu cieplnego w przypadku wszystkich rozpatrywanych ekosystemów, tzn. lasu iglastego, ziemniaków i pszenicy jarej dała następujące wyniki: w badanym wieloletniu 1964-2000 zmalał udział strumienia ciepła utajonego w saldzie promieniowania (ryc. 5a), natomiast wzrósł udział strumienia ciepła jawnego na powierzchni czynnej rozpatrywanych ekosystemów (ryc. 5b i c). Potwierdzeniem ujawnionych tendencji wśród składowych bilansu cieplnego jest rosnący współczynnik Bowena, który jest ilorazem gęstości strumienia ciepła jawnego do utajonego (Bowen 1926) (ryc. 5d).



Ryc. 5. Zmiany składowych bilansu cieplnego w sezonie wegetacji lasu iglastego, ziemniaka i pszenicy jarej we Wrocławiu-Swojcu w latach 1964-2000: a) średnich sezonowych ilorazów strumienia ciepła utajonego i salda promieniowania ( $LE/R_n$ ), b) średnich sezonowych ilorazów strumienia ciepła jawnego i salda promieniowania ( $H/R_n$ ), c) średnich sezonowych wartości strumienia ciepła jawnego ( $H$ ), d) średnich sezonowych wartości współczynnika Bowena ( $H/LE$ )

Fig. 5. Variations of heat balance components during the growing seasons of coniferous forest, potatoes and spring wheat in Wrocław-Swojec in the period 1964-2000: a) mean ratio values of latent heat flux and net radiation ( $LE/R_n$ ), b) mean ratio values of sensible heat flux and net radiation ( $H/R_n$ ), c) mean values of sensible heat flux ( $H$ ), d) mean values of the Bowen's ratio ( $H/LE$ )

Z badań nad zmiennością temperatury powietrza w wieloleciu 1964-2000 wynika, że podczas całego roku większy przyrost temperatury zaobserwowano w dwóch ostatnich dekadach XX w. ( $0,7^{\circ}\text{C}/10$  lat) niż w całym badanym wieloleciu ( $0,3^{\circ}\text{C}/10$  lat). Półrocze chłodne w ostatnich dwóch dekadach charakteryzowało się większym przyrostem temperatury ( $0,5^{\circ}\text{C}/10$  lat) niż w badanym wieloleciu ( $0,2^{\circ}\text{C}/10$  lat). Półrocze ciepłe charakteryzowało się takimi samymi przyrostami temperatury jak podczas całego roku ( $0,3^{\circ}\text{C}/10$  lat) w całym wieloleciu i  $0,7^{\circ}\text{C}/10$  lat w dwóch ostatnich dekadach XX w. (tab. 2).

Tab. 2. Podstawowe charakterystyki statystyczne temperatury powietrza we Wrocławiu-Swojcu w latach 1964-2000

Table 2. Basic statistical characteristics of air temperature at Wrocław-Swojec Observatory in the period 1964-2000

Okres Period	$T_{sr}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$S_T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	A	Równanie regresji Regression equation	Tendencja ( $^{\circ}\text{C}/10$ lat) Tendency ( $^{\circ}\text{C}/10$ years)
I-XII (1964-2000)	8,69	0,84	0,39	$y = 0,03x + 8,12$	0,3*
IV-IX (1964-2000)	14,70	0,78	0,06	$y = 0,03x + 14,12$	0,3*
X-III (1964-2000)	2,66	1,24	-0,43	$y = 0,02x + 2,25$	0,2
I-XII (1980-2000)	8,87	0,97	-0,29	$y = 0,07x + 8,05$	0,7*
IV-IX (1980-2000)	14,93	0,83	-0,22	$y = 0,07x + 14,11$	0,7*
X-III (1980-2000)	2,80	1,40	-0,55	$y = 0,05x + 2,31$	0,5

$T_{sr}$  – średnia temperatura powietrza,  $S_T$  – odchylenie standardowe temperatury, A – współczynnik skośności, \* – statystycznie istotne dla  $\alpha=0,05$

$T_{sr}$  – mean air temperature,  $S_T$  – standard deviation of temperature, A – skewness coefficient, \* – statistically significant for  $\alpha=0.05$

## Wnioski

1. Wielolecie 1964-2000 we Wrocławiu-Swojcu charakteryzuje się wzrostem rocznych sum ewapotranspiracji potencjalnej i malejącym trendem rocznych sum opadowych.
2. Roczne sumy klimatycznego bilansu wodnego w wieloleciu 1964-2000 wykazują pogłębiające się deficyty opadów w tym rejonie, szczególnie widoczne w dwóch ostatnich dekadach XX w.
3. Wyznaczony wskaźnik suchości klimatu można interpretować następująco: w wieloleciu 1964-2000 w okresie wiosennym i letnim zaobserwowano przewagę parowania nad opadami, jedynie jesień i zima były okresem retencjonowania wody w glebie.
4. Rosnące deficyty wody w rejonie Swojca są przyczyną wzrostu strumienia ciepła jawnego w okresie wegetacji lasu iglastego, pszenicy jarej i ziemniaków oraz spadku strumienia ciepła utajonego.
5. Konsekwencją rosnących wartości strumienia ciepła jawnego, przeznaczonego na ogrzanie atmosfery, jest wzrost temperatury powietrza w tym rejonie w wieloleciu 1964-2000 o  $0,3^{\circ}\text{C}/10$  lat, a w ostatnich dwóch dekadach XX w. o  $0,7^{\circ}\text{C}/10$  lat, co oznacza ocieplenie klimatu w tym rejonie.

Praca wykonana w ramach grantu KBN 2 P06S 022 27

## Literatura

- Bac S., Rojek M., 1977, *Metodyka oceny stosunków wodnych obszarów rolniczych na podstawie danych klimatycznych*, Zesz. Nauk ART Olsztyn, 21, 13-24.
- Bac S., Rojek M., 1979, *Klimatyczny bilans wodny a odpływy w Polsce*, Prz. Geofiz., 24, 3, 293-297.
- Bac S., Rojek M., 1982, *Klimatyczne bilanse wodne w Polsce*, [w:] *Agroklimatyczne podstawy melioracji wodnych w Polsce*, S. Bac (red.), PWRiL, Warszawa.
- Bowen I.S., 1926, *The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface*, Phys. Rev., 27, 779-787.
- Kędziora A., 1999, *Podstawy agrometeorologii*, PWRiL, Poznań.
- Kożuchowski K. (red.), 2004, *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Łódź.
- Lorenc H., 2000, *Studia nad 220-letnią (1779-1998) serią temperatury powietrza w Warszawie oraz ocena jej wiekowych tendencji*, Mat. Bad. IMGW, Ser. Meteorologia, 31, 1-103.
- Musiał E., 2001, *Modelowanie procesu ewapotranspiracji rzeczywistej i prognozowanie jego tendencji*, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, 412, Rozprawy, 182, 1-116.
- Olejniak 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, 16, 601-617.
- Penmann H.L., 1948, *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*, Proc. Roy. Soc., 193, 120-146.
- Penmann H.L., 1950, *Evaporation over the British Isles*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 76, 372-83.
- Penmann H.L., 1956, *Evaporation: an introductory survey*, Netherlands J. Agric. Sci., 4-29.
- Penmann H.L., 1963, *Vegetation and Hydrology*, Tech. Comm. Nr 53, Comm. Bur. of Soils, Harpenden.
- Rojek M., 1994, *Time variability of climatic water balances in selected meteorological stations in Poland*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 405, 147-153.
- Rojek M., Wiercioch T., 1994, *Indicator evapotranspiration os summer half-year in various long-term periods*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 405, 155-161.
- Rojek M.M., Wiercioch T., 1995, *Zmienność czasowa i przestrzenna parowania wskaźnikowego, ewapotranspiracji aktualnej i niedoborów opadowych w Polsce nizinnej w okresie 1951-1990*, ZNAR, 268, Monografie, 6, 1-51.
- Trepińska J. (red.), 1997, *Wahania klimatu w Krakowie (1792-1995)*, Inst. Geogr. UJ, Kraków.
- Zmiany i zmienność klimatu Polski. Ich wpływ na gospodarkę, ekosystemy i człowieka*, Ogólnopolska konferencja naukowa, 4-6 listopada 1999, Łódź.

## Summary

The aim of our study was to find out the reason of climate warming in the Wrocław region in years 1964-2000. We analysed the variability of water relations in our search for an answer, using climatic water balance during the period 1964-2000, and heat relations during the vegetation period of three ecosystems: coniferous forest, potatoes

and spring wheat. The 1964-2000 period in Wrocław was characterized by increasing potential evapotranspiration and a trend to decreasing yearly amounts of atmospheric precipitation. The calculated values of climatic water balance provided evidence for an aggravating precipitation deficit in this area. CWB is connected with active surface heat balance by water vapour which transports an enormous amount of energy into the atmosphere. Heat balance components are not independent due to the rule of priority to evapotranspiration. Therefore, both excess and shortage of water, as defined by the CWB, at the beginning or during the vegetation period determine the values of various heat balance streams. In our study we analysed the variability of all heat balance components in the vegetation period for coniferous forest, potatoes and spring wheat. Our investigation revealed that aggravating precipitation deficits lead to diminishing latent heat flux generated from the surface of forests, spring wheat and potatoes, as well as enlarging sensible heat flux. The last step of our study was to analyse changes in temperature during the years 1964-2000 in Wrocław.