

JOANNA AMELIA KAMIŃSKA

**ZMIANY KLIMATYCZNEGO
BILANSU WODNEGO
I BILANSU CIEPLNEGO PSZENICY JAREJ**



WROCŁAW 2008

Opiniodawca

prof. dr hab. inż. Leszek Łabędzki

Redaktor merytoryczny

dr hab. inż. Krzysztof Pulikowski, prof. nadzw.

Opracowanie redakcyjne

mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz

Korekta:

dr Ewa Jaworska
Janina Szydłowska

Łamanie

Alina Gebel

Projekt okładki

Teresa Alicja Chmura

Zdjęcia na okładce

Marek Liszewski

Monografie LVIII

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2008

ISSN 1898-1151

ISBN 978-83-60574-30-0

WYDAWNICTWO UNIwersYTETU PRZYRODnicZEGO WE WROcŁAWIU

Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki
ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel. 071 328–12–77
e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 100 + 16 egz. Ark.druk. 5,5
Druk i oprawa: Wydawnictwo Tekst Sp. z o.o.
ul. Kossaka 72, 85–307 Bydgoszcz

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	5
2. Przegląd literatury	7
3. Cel i zakres badań	11
4. Metodyka badań	12
4.1. Bilans cieplny	12
4.2. Klimatyczny bilans wodny	15
5. Wyniki badań	16
5.1. Przegląd podstawowych elementów meteorologicznych	16
5.2. Ewapotranspiracja wskaźnikowa (ET_0)	23
5.3. Klimatyczny bilans wodny w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII)	24
5.3.1. Gorzów Wielkopolski	24
5.3.2. Łódź	32
5.3.3. Bydgoszcz	38
5.3.4. Wrocław-Swojec	45
5.4. Bilans cieplny pszenicy jarej w okresie wegetacji (IV–VIII)	51
5.4.1. Gorzów Wielkopolski – wielolecie 1970–1995	51
5.4.2. Gorzów Wielkopolski – lata o ekstremalnych opadach	53
5.4.3. Łódź – wielolecie 1954–1995	57
5.4.4. Łódź – lata o ekstremalnych opadach	61
5.4.5. Bydgoszcz – wielolecie 1945–2004	64
5.4.6. Bydgoszcz – lata o ekstremalnych opadach	67
5.4.7. Wrocław-Swojec – wielolecie 1964–2000	71
5.4.8. Wrocław-Swojec – lata o ekstremalnych opadach	73
5.4.9. Współczynnik Bowena	77
6. Dyskusja i podsumowanie	79
7. Wnioski	82
8. Piśmiennictwo	83

1. WSTĘP

Wszystkie procesy zachodzące w układzie planeta-atmosfera występują dzięki istnieniu przestrzennego rozkładu energii. Jedyne źródłem dostarczającym energię do układu jest promieniowanie słoneczne, które ze względu na wysoką temperaturę Słońca jako ciała je emitującego nazywane jest krótkofalowym. Zwiększa ono energię wewnętrzną układu, która częściowo jest wypromieniowywana w postaci promieniowania długofalowego, a częściowo pochłaniana przez układ. Energia znajdująca się w układzie podlega ciągłym przemianom, powodując sezonowe oraz wieloletnie zmiany strumieni energii przypadających na parowanie, kondensację, ruchy powietrza, ogrzewanie gleby oraz atmosfery itp. W skali rozważanych w pracy wieloleci wartość stałej słonecznej odpowiadającej ilości energii dochodzącej do górnej granicy atmosfery jest stała i wynosi $1380 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Istotne znaczenie dla struktury bilansu cieplnego Ziemi ma jej albedo (stosunek ilości energii promieniowania odbitego do ilości promieniowania padającego na określoną powierzchnię), na które zasadniczy wpływ wywiera sposób użytkowania gruntów. Zmiana powierzchni leśnej i trawiastej na nieużytki rolne lub pola uprawne prowadzi do wzrostu albedo, a w konsekwencji – utraty większej ilości energii. W obecnych czasach szczególnej wagi nabiera planowanie zagospodarowania terenu, które powinno uwzględniać nie tylko potrzeby gospodarczo-produkcyjne poszczególnych krajów, ale również wpływ na lokalne i globalne bilanse zarówno cieplne, jak i wodne. Wielkość produkcji rolniczej, rodzaj uprawianych roślin, a także struktura użytkowania gruntów decydują w dużym stopniu o procesach zachodzących na styku atmosfery i podłoża. Dlatego rolnictwo odgrywa i będzie odgrywać ważną rolę przy rozwiązywaniu problemów środowiskowych, które pojawiają się wraz ze zmianami klimatu [Kożuchowski 2004; Musiał 2001; Musiał i in. 2004; Ryszkowski, Kędziora 1993; Trepńska 1997]. Prezentowana praca jest poświęcona bilansowi cieplnemu pszenicy jarej, która w okresie maksymalnej ewapotranspiracji (przeciętnie w pierwszej dekadzie czerwca) odparowuje z powierzchni najwięcej wody wśród najpopularniejszych w naszym kraju upraw [Bac, Rojek 1999; Rojek, Wiercioch 1995]. W Polsce około $18,5 \text{ tys. km}^2$ (5,9%) powierzchni kraju (dane GUS 2005) w okresie od kwietnia do sierpnia porośnięte jest pszenicą jarą.

Drugim, obok energii, czynnikiem niezbędnym do produkcji rolnej jest woda. Jej ogólna ilość w układzie planeta-atmosfera nie zmienia się w rozpatrywanej skali czasowej. Zmianom ulega jedynie sposób jej przestrzennego i czasowego rozkładu. Zachwiania w równowadze wodno-energetycznej Ziemi prowadzą do coraz częstszego występowania dotkliwych susz, powodzi, upałów, mrozów itp. Jedną z metod opisu stosunków wodnych obszaru jest klimatyczny bilans wodny. Bilanse te można rozpatrywać zarówno w skali kontynentu, jak i kraju, zlewni czy dowolnie wyznaczonego obszaru.

Jednoczesna znajomość struktury przestrzenno-czasowej bilansu cieplnego i klimatycznego bilansu wodnego umożliwia ukazanie skali oddziaływania powierzchni na zmiany zachodzące w przypowierzchniowej warstwie powietrza, a co za tym idzie – w całym jego profilu. Niewątpliwie jedną z przyczyn obecnie obserwowanych zmian klimatu są zmiany w strukturze bilansu cieplnego powierzchni Ziemi, wynikające z jej zagospodarowania oraz warunków wodnych. W pracy przedstawiono charakterystykę obu bilansów dla wybranej powierzchni czynnej (pszenicy jarej).

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Zmianami klimatu, jego wahaniami i tendencjami badacze zajmują się od dawna, ale dopiero w ciągu ostatnich kilkunastu lat zainteresowanie to stało się inspiracją do badań mogących potwierdzić przypuszczenia o zasadniczej zmianie systemu klimatycznego. Susze, ulewne deszcze, przymrozki zagrażające bezpieczeństwu ludzi oraz jakości i ilości plonów zmuszają do prowadzenia szczegółowych analiz mających na celu ustalenie, jakie czynniki wywierają istotny wpływ na zmianę klimatu.

Opis zmian klimatu dla określonych rejonów Polski oraz oddziaływanie rolnictwa na te zmiany przedstawiali w swoich pracach między innymi Ryszkowski i Kędziora [1993], Trepińska [1997], Kożuchowski [2004], Musiał [2001], Musiał, Gąsiorek i Rojek [2004].

Klimat, rozumiany jako następstwo frontów i mas atmosferycznych oraz ich częstotliwości, jest kształtowany przez przepływ energii, obieg wody i ogólną cyrkulację atmosfery. Przepływ energii można opisać za pomocą bilansu cieplnego, a obieg wody – przy zastosowaniu bilansu wodnego. Jednym ze sposobów ilościowego opisu bilansu wodnego jest klimatyczny bilans wodny.

Do literatury polskiej pojęcie klimatycznego bilansu wodnego zostało wprowadzone przez Baca i Rojka w 1977 r. [Bac, Rojek 1977, 1979, 1982]. Autorzy zdefiniowali klimatyczny bilans wodny jako różnicę pomiędzy opadem a parowaniem wskaźnikowym. Bac i Rojek jako wielkość wyjściową przyjęli parowanie z wolnej powierzchni wodnej, mierzone za pomocą ewaporometru Wilda zainstalowanego na lądzie. Na podstawie badań potwierdzili założenie, że parowanie wskaźnikowe pozwala ocenić zdolności atmosfery do przyjęcia powstającej pary wodnej. Parowanie to wyznaczyli metodą Baca (jako funkcję niedosytu wilgotności, prędkości wiatru oraz sumy promieniowania). Autorzy przedstawili przestrzenny rozkład klimatycznego bilansu wodnego na podstawie danych ze 130 stacji meteorologicznych z lat 1951–1970. W pracach [Rojek 1994; Rojek, Wiercioch 1995] autorzy rozszerzyli badania elementów klimatycznych bilansów wodnych do wielolecia 1951–1990. Analizę klimatycznych bilansów wodnych z zastosowaniem ewapotranspiracji wyznaczonej modelem MBC [Olejnik 1988, 1996; Kędziora 1999] można znaleźć w pracach [Olejnik, Kędziora 1991; Olejnik i in. 2001].

Badaniem przebiegu składników klimatycznego bilansu wodnego jako różnicy między opadem a ewapotranspiracją potencjalną wyznaczoną metodą Doroszewskiego [Doroszewski, Górski 1995] w okresie wegetacji (IV–X) dla pięciu miejscowości w Polsce (Szczecin, Wrocław, Łódź, Suwałki, Przemyśl) zajmował się również Kożuchowski [2004].

W ilościowej ocenie klimatycznego bilansu wodnego bardzo ważną rolę odgrywają wartości ewapotranspiracji, a zatem jej rodzaj i metoda wyznaczania. Na przełomie lat 40-tych i 50. XX w. Penman [1948] zdefiniował ewapotranspirację potencjalną (ETP)

jako wielkość parowania z niskiej rośliny zielonej całkowicie pokrywającej powierzchnię, o stałej wysokości i optymalnych warunkach zaopatrzenia w wodę. Tak określona ETP zależy jedynie od warunków meteorologicznych oraz rodzaju roślinności i według Schmucka [1969] wyraża aktualną chłonność atmosfery w stosunku do wytwarzającej się pary wodnej. Pod koniec lat 70. XX w. wprowadzono pojęcie ewapotranspiracji wskaźnikowej jako ewapotranspirację hipotetycznej rośliny o stałej wysokości 12 cm, stałej oporności stomatycznej $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$, stałym albedo wynoszącym 0,23, w pełni zakrywającej glebę, w warunkach aktywnego rozwoju i nieograniczonego dostępu wody [Allen i in. 1998]. Parowanie z danego terenu w konkretnych warunkach przyrodniczych uwzględniających czynniki glebowe (strukturę i wilgotność gleby oraz głębokość poziomu wody gruntowej), biologiczne (gatunek roślin, ich stan zdrowotny, fazę fenologiczną oraz gęstość biomasy) i agrotechniczne (sposób uprawy, nawożenie, nawadnianie itp.) nosi nazwę ewapotranspiracji rzeczywistej [Kędziora 1999]. W literaturze występuje również pojęcie parowania z wolnej powierzchni wodnej i jego wartość wyznaczana modelowo nazywana jest parowaniem wskaźnikowym. Zależności między powyższymi rodzajami parowania zajmowały i nadal interesują badaczy na całym świecie [Bac 1968; Feddes, Laenselink 1994; Allen i in. 1998; Łabędzki i in. 1996; Łabędzki 1997, 1999, 2000; Imark, Haman 2003; Kasperska-Wołowicz, Łabędzki 2004; Łabędzki 2006].

Ogromne znaczenie w kształtowaniu się klimatu przyziemnych warstw powietrza i gleby odgrywa wymiana ciepła zachodząca między powierzchnią czynną i przypowierzchniowymi warstwami powietrza i gleby. Dlatego rozkład poszczególnych elementów klimatu w czasie i przestrzeni może być najlepiej zbadany i wyjaśniony na podstawie analizy struktury bilansu cieplnego powierzchni czynnej [Olejnik 1986], [Kapuściński 1999]. Badania struktury bilansu cieplnego można przeprowadzać dla różnej wielkości obszarów (powierzchni liścia, ekosystemu, regionu, kraju, globu). Rozważania teoretyczne dotyczące bilansu cieplnego Ziemi wraz z analizą jego struktury przedstawił w swoich pracach Molga [1955, 1972].

Na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych w Katedrze Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Poznaniu pod kierownictwem prof. A. Kędziory opracowano model matematyczny, w którym składowe bilansu cieplnego powierzchni czynnej wyznacza się jako funkcje wartości podstawowych elementów meteorologicznych (temperatura powietrza, niedosyt wilgotności powietrza, prędkość wiatru, usłonecznienie) i fazy rozwojowej roślin [Kędziora i in. 1989; Olejnik i Kędziora 1991]. Model ten z powodzeniem zastosowano w skali zlewni [Kędziora i in. 1989; Olejnik i Kędziora 1991; Kędziora i in. 1992], regionu [Olejnik i Kędziora 1991] oraz kraju [Ryszkowski i in. 1991]. W latach 90. XX w. przeprowadzono serię pomiarów składników oraz struktury bilansu cieplnego różnych powierzchni rolniczych. Analiza tych pomiarów umożliwiła wprowadzenie modyfikacji w pierwotnym modelu bilansu cieplnego [Kędziora i in. 1994; Leśny 1998; Olejnik i in. 1999; Leśny i in. 2001; Leśny i in. 2002]. Szczegółowy opis modelu pozwalającego oszacować strukturę bilansu cieplnego na podstawie danych meteorologicznych oraz informacji o użytkowaniu gruntów i danych fenologicznych zawarł w swojej pracy Olejnik [1996]. Autor po raz pierwszy zastosował model z wykorzystaniem numerycznych technik obliczeniowych opartych na systemie pól regularnych. Ponieważ model opiera się na parametryzacji wykorzystującej dane meteoro-

logiczne, mógł być zastosowany do oceny bilansu z uwzględnieniem zmian klimatycznych (dane z modelu GCM).

Badania bilansu cieplnego nie kończą się jednak na powierzchniach lądów. W pracy [Omstedt 2003] znajduje się analiza wodnego i cieplnego bilansu Morza Bałtyckiego i odniesienie wyników do zmian klimatu w badanym obszarze.

Jednoczesna analiza bilansu cieplnego i klimatycznego bilansu wodnego pozwala szerzej spojrzeć na istotę zmian klimatu. Problemem estymacji składowych obu bilansów zajmowało się wielu badaczy [Holtslag and Van Ulden 1983; Morton 1983; Ryszkowski i Kędziora 1987; Kovacs 1988; Olejnik 1988; Eulenstein i in. 2005; Kimura i zespół 2005]. W pracy Olejnika i Kędziory [1991] opisana jest zmienność składowych bilansu cieplnego i klimatycznego bilansu wodnego dla lata (VI–VIII), okresu wegetacyjnego (IV–IX) oraz całego roku w zlewniach rzek: Wyskoć (183 km²), Główna (221 km²), Wrześnica (360 km²) oraz Sama (393 km²). Autorzy wyznaczyli składowe obu bilansów, biorąc pod uwagę procentowy udział poszczególnych form zagospodarowania terenu. Klimatyczny bilans wodny w sezonie wegetacyjnym był ujemny we wszystkich badanych zlewniach. Oznacza to, że niedobór wody zdarza się bardzo często w okresie, kiedy zapotrzebowanie roślin na wodę jest największe. W pracy znajdują się również mapy aktualnej struktury bilansu cieplnego dla poszczególnych zlewni, na których obszary charakteryzowane są przez wartości współczynnika Bowena.

Strukturę bilansu cieplnego łąnów (pszenica, ziemniaki) oraz lasu iglastego na tle ekstremalnych warunków opadowych opisano w pracach Bubnowskiej i współautorów [2005 a, b].

Drugi nurt badań związanych z bilansem cieplnym dotyczy metod pomiaru składowych tego bilansu. Problematyka ta stała się popularna w latach siedemdziesiątych, lecz ówczesne metody badań terenowych były stosunkowo skomplikowane [Taylor 1972]. Dość łatwo można mierzyć saldo promieniowania oraz ciepło glebowe (bilansomierze, strumieniomierze ciepła glebowego), zasadnicze problemy stwarzają pomiary strumieni ciepła utajonego i jawnego. Obecnie znanych jest kilka metod pomiarowych: korelacyjna, profilowa oraz bilansu cieplnego.

Metoda korelacyjna zakłada, że nad jednorodną powierzchnią w stanie stacjonarnego przepływu porcja powietrza niesie ze sobą pewną porcję pędu i energii cieplnej oraz zawiera określoną ilość pary wodnej [Businger i in. 1967; Rosenberg 1974; Lee, Black 1993]. Sposób ten daje ogromne możliwości pomiarowe, a błąd pomiarowy, zależny od rodzaju zastosowanych urządzeń, nie przekracza kilku procent. Zestaw pomiarowy oparty na tej metodzie skonstruowany został między innymi na British Columbia University w Kanadzie [Olejnik 1994]. W metodzie profilowej główne założenie mówi, że gęstość pionowych strumieni ciepła i pary wodnej w przygruntowej warstwie powietrza, w stanie równowagi obojętnej atmosfery, jest proporcjonalna do pionowych gradientów temperatury i pary wodnej. Ten sposób pozwala na wyznaczenie każdej składowej bilansu cieplnego osobno (niezależnie) [Fritschen, Simpson 1989; Kim, Verma 1990]. Metodę bilansu cieplnego stosuje się wtedy, kiedy niemożliwe jest wyznaczenie wszystkich składowych niezależnie.

W Katedrze Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Poznaniu w połowie lat osiemdziesiątych rozpoczęto prace nad automatycznym systemem pomiarowym do wyznaczania struktury bilansu cieplnego metodą średnich profili i bilansu cieplnego

z wykorzystaniem stosunku Bowena [Olejnik 1986, 1989; Olejnik i in. 1994]. Zastosowana w pracy Olejnika [1995] metoda średniego profilu wymaga pomiarów pionowych rozkładów: temperatury powietrza, ciśnienia pary wodnej oraz prędkości wiatru. Dla zbilansowania energii cieplnej mierzono również saldo promieniowania i strumień ciepła glebowego. Pierwotna wersja takiego systemu powstała na początku lat osiemdziesiątych [Olejnik 1986], ale wraz z rozwojem technik numerycznych system był ciągle modyfikowany [Leśny i in. 2001]. W skład systemu pomiarowego wchodzi następujące czujniki: pyranoalbedometr, bilansomierz, rumboanemometr, strumieniomierz glebowy, psychrometr kwarcowy oraz anemometr czaszowy. Pomiary wykonuje się z częstotliwością raz na godzinę. Dane uzyskane w wyniku wieloletnich pomiarów terenowych w różnych ekosystemach i dla różnych faz rozwojowych roślin posłużyły do opracowania modelu wyznaczania wartości składników bilansu powierzchni czynnej, wykorzystując jedynie podstawowe dane meteorologiczne.

3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Zamierzeniem autorki było:

- poznanie struktury czasowej klimatycznego bilansu wodnego oraz bilansu cieplnego powierzchni czynnej pokrytej pszenicą jara,
- wykazanie zmian czasowych zachodzących w strukturze obu bilansów.

Cel ten był realizowany poprzez przedstawienie i analizę modelowych wyników badań dotyczących wartości składowych klimatycznego bilansu wodnego oraz bilansu cieplnego dla czterech zróżnicowanych klimatycznie regionów Polski.

W pracy przyjęto okres wegetacji pszenicy jarej trwający od 1 kwietnia do 31 sierpnia.

Obliczenia przeprowadzono na podstawie dekadowych wartości: usłonecznienia rzeczywistego, ciśnienia pary wodnej, temperatury powietrza, prędkości wiatru oraz opadów pochodzących z czterech stacji meteorologicznych: Bydgoszcz (1946–2004), Gorzów Wlkp. (1970–1995), Łódź (1954–1995), Wrocław-Swojec (1964–2000). Dla każdej ze stacji wybrano rok „suchy”, o najniższej sumie opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII), oraz rok „mokry”, o najwyższej sumie opadów w okresie IV–VIII. Dla lat „suchych” i „mokrych” przeprowadzono szczegółową analizę dekadowych wartości składowych obu bilansów.

Postawiono następujące hipotezy badawcze:

- klimatyczny bilans wodny wskazuje na rosnące niedobory wody w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII);
- w strukturze bilansu cieplnego zachodzą zmiany przejawiające się zużywaniem coraz większych ilości energii na ogrzewanie atmosfery, czyli występuje tendencja wzrostowa wartości współczynnika Bowena, co związane jest ze wzrostem temperatury w wieloleciu w badanych regionach;
- występuje zgodność między zmianami w klimatycznym bilansie wodnym i strukturze bilansu cieplnego powierzchni czynnej.

4. METODYKA BADAŃ

4.1. Bilans cieplny

Do wyznaczania składowych bilansu cieplnego powierzchni czynnej zastosowano model opracowany w Katedrze Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Poznaniu [Olejnik, Kędziora 1991; Kędziora 1999], zwany modelem MBC.

Ponieważ w pracy analizuje się bilans cieplny pszenicy jarej, składowe bilansu cieplnego oraz saldo promieniowania zostały wyznaczone dla okresu wegetacji tej rośliny, czyli od kwietnia do sierpnia.

W celu wyznaczenia składników bilansu cieplnego oraz salda promieniowania w modelu MBC [Kędziora i in. 1989; Olejnik i Kędziora 1991; Olejnik 1996; Kędziora 1999] potrzebna jest znajomości następujących czynników meteorologicznych:

- średnia dekadowa wartość temperatury powietrza na poziomie pomiarowym 2 m nad powierzchnią gruntu ($^{\circ}\text{C}$),
- średnia dekadowa wartość prędkości wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
- średnia dekadowa wartość dobowego ciśnienia pary wodnej na poziomie pomiarowym 2 m nad powierzchnią gruntu (hPa),
- suma dekadowa usłonecznienia rzeczywistego (godz.),
- suma dekadowa wartości usłonecznienia astronomicznie możliwego (godz.),
- średnie dekadowe wartości promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Bilans energii powierzchni czynnej, czyli każdej powierzchni, przez którą zachodzi proces przepływu masy i energii, można ująć następującym równaniem [Paszyński 1972; Shuttleworth, Wallace 1985; Kędziora 1999; Kapuściński 2000;]:

$$R_n + LE + H + G = 0 \quad (1)$$

gdzie:

R_n – gęstość strumienia promieniowania netto ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

G – gęstość strumienia ciepła glebowego ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

H – gęstość strumienia ciepła jawnego wymianianego z atmosferą ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

LE – gęstość strumienia ciepła utajonego ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Zakłada się, że strumienie energii płynące w stronę powierzchni czynnej przyjmują znak dodatni, a płynące od powierzchni – znak ujemny [Kędziora 1999]. Każdy ze

strumieni w równaniu (1), w zależności od warunków środowiskowych i od pory doby, może przybierać wartości dodatnie lub ujemne [Paszyński 1979; Olejnik 1986, 1989, 1996; Kędziora 1995].

Najważniejszą wielkością charakteryzującą warunki energetyczne środowiska przyrodniczego jest promieniowanie netto, określające ilość energii użytecznej dla ekosystemu. Promieniowanie netto jest chwilowym stanem bilansu promieniowania odniesionym do jednostkowej powierzchni czynnej.

Równanie na oszacowanie wartości promieniowania netto otrzymano jako różnicę między pochłoniętym przez powierzchnię promieniowaniem (krótkofalowym Słońca oraz długofalowym atmosfery) a wyemitowanym przez powierzchnię promieniowaniem długofalowym. Bilans promieniowania w zakresie krótkofalowym R_k wyznaczono wg Blacka, a bilans długofalowy R_l obliczono z formuły Brunta z modyfikacją Kędziory [Kędziora i in. 1981]:

$$R_n = R_k - R_l \quad (2)$$

$$R_k = (1 - \alpha) R_0 (0,22 + 0,54u) \quad (3)$$

$$R_l = -5,68 \cdot 10^{-8} \cdot (t + 273)^4 \cdot (0,56 - 0,08\sqrt{e_a}) \cdot (0,1 + 0,9u) \quad (4)$$

gdzie:

R_0 – promieniowanie na granicy atmosfery ($W \cdot m^{-2}$),

t – temperatura powietrza na wysokości 2m ($^{\circ}C$),

u – uśłonecznienie względne,

e_a – ciśnienie pary wodnej na wysokości 2m (hPa),

α – albedo powierzchni czynnej.

Do wyznaczenia składowych rozchodowych bilansu cieplnego niezbędne jest określenie stopnia rozwoju aparatu transpiracyjnego rośliny pokrywającej badaną powierzchnię, który można opisać za pomocą współczynnika fazy rozwojowej f . Wartość tego współczynnika waha się od 0 – dla nieporośniętej gleby do 1 – dla roślin o w pełni wykształconej szacie roślinnej i została określona przez Karlińskiego i Kędziórę [1968] na podstawie kalendarza fenologicznego. Średnie miesięczne wartości współczynnika fazy rozwojowej f pszenicy jarej wynoszą [Kędziora i in. 1989]:

Miesiąc	IV	V	VI	VII	VIII
f	0,03	0,27	0,83	1	0,66

Strumień ciepła glebowego wyznacza się następująco [Kędziora 1999]:

$$G = -0,2Rn (1 - 0,75f) \left[\sin \left(\frac{\pi}{6} (j - 2) \right) \right] \quad (5)$$

gdzie:

j – numer miesiąca w roku, licząc od stycznia,

f – współczynnik fazy rozwojowej rośliny.

W meteorologii bardzo ważną rolę pełni współczynnik Bowena [1926] β , który wyraża stosunek ciepła jawnego do utajonego mierzonych w tej samej jednostce czasu:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (6)$$

Kędziora i Olejnik [1991] oraz Olejnik [1996] określili związek między wartością ilorazu Bowena, a niektórymi elementami meteorologicznymi i fazą rozwojową roślin w następujący sposób:

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

gdzie:

d – niedosyt wilgotności powietrza (hPa),

v – prędkość wiatru na wysokości 2m nad powierzchnią gruntu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

t – temperatura powietrza na wysokości pomiarowej ($^{\circ}\text{C}$),

u – uśłonecznienie względne,

f – współczynnik fazy rozwojowej rośliny.

W przypadku gdy pomiary prędkości wiatru odbywały się na wysokości większej niż 2 m nad powierzchnią czynną, zastosowano odpowiedni przelicznik.

Znając wartość współczynnika Bowena wyznaczoną ze wzoru (7) oraz strumień ciepła glebowego (5), obliczono wartość strumienia ciepła utajonego LE ze wzoru:

$$LE = -\frac{Rn + G}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

Znając Rn , LE oraz G , wyznaczono strumień ciepła jawnego H z poniższej zależności:

$$H = -(R_n + LE + G) \quad (9)$$

Na podstawie wartości współczynnika Bowena można określić strukturę bilansu cieplnego rozważanej powierzchni czynnej, czyli rzeczywiste proporcje pomiędzy strumieniem ciepła jawnego i utajonego. Kędziora, Olejnik i Kapuściński [1989] wprowadzili klasy struktury bilansu cieplnego, uzależniając je od wartości współczynnika Bowena.

Klasa	$\beta = \frac{H}{LE}$	Nazwa klasy
1	$\beta < 0$	skrajnie ewaporacyjna
2	$0 < \beta < 0,10$	silnie ewaporacyjna
3	$0,11 < \beta < 0,25$	ewaporacyjna
4	$0,25 < \beta < 0,43$	ewaporacyjno-konwekcyjna
5	$0,44 < \beta < 0,67$	konwekcyjna
6	$0,68 < \beta < 1,0$	silnie konwekcyjna
7	$1,0 < \beta$	skrajnie konwekcyjna

4.2. Klimatyczny bilans wodny

Pojęcie klimatycznego bilansu wodnego (KBW) zostało zdefiniowane i wprowadzone w 1977 r. przez Baca i Rojka [1982] jako różnica pomiędzy opadami a parowaniem wskaźnikowym.

W literaturze spotyka się pojęcie klimatycznego bilansu wodnego również jako różnicę pomiędzy opadem a ewapotranspiracją potencjalną wyznaczoną metodą Doroszewskiego i Górskiego [Kozuchowski 2004].

W prezentowanym podejściu klimatyczny bilans wodny jest zdefiniowany jako różnica pomiędzy opadem P a ewapotranspiracją wskaźnikową ET_o wyznaczoną metodą Penmana.

$$KBW = P - ET_o \quad (10)$$

➤ Metoda Penmana

Klasyczne równanie Penmana [1948] opisuje ewapotranspirację wskaźnikową jako funkcję tangensa kąta nachylenia siecznej krzywej opisującej ciśnienie pary wodnej jako funkcję temperatury (Δ), zdolności ewaporacyjnej powietrza, oznaczającą potencjalną możliwość wchłaniania pary wodnej przez warstwę atmosfery leżącą nad powierzchnią parującą (E_a), promieniowania netto (R_n), strumienia ciepła glebowego (G) oraz stałej γ .

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (11)$$

W pracy zastosowano powyższe równanie do obliczenia ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o :

$$ETP = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} (R_n + G') + E_a}{\left(1 + \frac{\Delta}{\gamma}\right)} \cdot \frac{n}{28,34} \quad (12)$$

gdzie:

$$E_a = 7,44d(1 + 0,54v) \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)},$$

$$G' = 0,2R_n \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)},$$

n – ilość dni w okresie,

γ – stała psychrometryczna $\gamma = 0,655 \text{ (hPa} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. Przegląd podstawowych elementów meteorologicznych

Do wyznaczania składowych klimatycznego bilansu wodnego oraz bilansu cieplnego wykorzystano wartości dekadowe pięciu elementów meteorologicznych pochodzące z pomiarów na wybranych stacjach. Punktowy charakter pomiarów powoduje, że ich reprezentatywność jest ograniczona, dlatego wnioski wynikające z badań można odnosić jedynie do najbliższego regionu. W związku z tym, że dysponowano danymi z całego roku kalendarzowego jedynie dla stacji Wrocław-Swojec oraz Bydgoszcz, porównanie warunków klimatycznych zostanie przeprowadzone tylko dla okresów wegetacji pszenicy jarej.

➤ Opad atmosferyczny

Wśród badanych rejonów najuboższe w opady są okolice Gorzowa Wielkopolskiego oraz Bydgoszczy (tab. 1). Charakteryzują się one najniższymi średnimi wartościami opadów oraz najsilniejszą asymetrią prawostronną. Oznacza to, że mimo i tak niskiej średniej sumy opadowej w większości lat suma opadu była niższa od przeciętnej. Spotykane są również lata o bardzo wysokich opadach w Bydgoszczy (maksymalny opad był o 113% wyższy od przeciętnej), które powodują wzrost wartości średniej. Średnia wartość opadów w okresie IV–VIII w rejonie Łodzi i Wrocławia przekracza 300 mm, a skośność, choć dodatnia, niewiele odbiega od zera, co oznacza, że rozkłady opadów są zbliżone do rozkładu symetrycznego. Największe zróżnicowanie (mierzone odchyleniem standardowym) wykazują opady w Bydgoszczy, gdzie odnotowano największą amplitudę sezonowych sum opadów wynoszącą 500 mm.

Najwyższe sumy opadów podczas okresu wegetacji odnotowano w lipcu we wszystkich stacjach. Sumy miesięczne w lipcu sięgały we Wrocławiu nawet 249,7 mm w 1997 roku.

Na podstawie sum opadów w okresie wegetacji pszenicy (IV–VIII) wyznaczone zostały trendy zmian tych sum (tab. 2). We wszystkich badanych rejonach stwierdzono tendencje ujemne (statystycznie istotne tylko w Łodzi), co oznacza, że w badanym wieloleciu sumy opadów maleją co z pewnością pogarsza warunki wodne w okresie wegetacji.

Tabela 1
Table 1

Podstawowe charakterystyki opadów P (mm)
Basic characteristics of precipitation P (mm)

Stacja Station	\bar{P}	$P_{\max.}$	$P_{\min.}$	\bar{P}	$P_{\max.}$	$P_{\min.}$	s	As	\bar{P} 1970–1995
Okres – Period Wrocław-Swojec (1964–2000)	I–XII 568,7	I–XII 764,4	I–XII 380,4	IV–VIII 326,3	IV–VIII 493,8	IV–VIII 161	IV–VIII 79,5	IV–VIII 0,22	IV–VIII 318,6
Bydgoszcz (1946–2004)	517,0	808,9	267,3	280,7	599,1	99,1	84,2	0,99	274,1
Gorzów Wilkp. (1970–1995)	*	*	*	266,3	460,0	153,6	68,2	0,75	266,3
Łódź (1954–1995)	*	*	*	312,4	476,7	134,5	74,6	0,15	298,6

\bar{P} – średni opad w wieloleciu – mean precipitation in perennial,

$P_{\max.}$ – maksymalny opad w wieloleciu – maximal precipitation in perennial,

$P_{\min.}$ – minimalny opad w wieloleciu – minimal precipitation in perennial,

s – odchylenie standardowe opadu w wieloleciu – standard deviation of precipitation,

As – skośność opadu w wieloleciu – skewness of precipitation,

P 1970–1995 – średni opad w wieloleciu 1970–1995 – mean precipitation in 1970–1995,

* – brak dostępu do danych – no data.

Tabela 2
Table 2

Równania trendów liniowych dla sum opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII)
na czterech stacjach pomiarowych
Linear regression equation for precipitation in vegetation period of spring wheat (IV–VIII)
at four observatories

Stacja Station	Równanie regresji Regression equation	Tendencje (mm/rok) Tendency (mm/year)
Wrocław-Swojec (1964–2000)	$y = 1,70x + 358,7$	-1,7 **
Bydgoszcz (1946–2004)	$y = -0,63x + 301,1$	-0,63
Gorzów Wlkp. (1970–1995)	$y = -0,81x + 277,7$	-0,81
Łódź (1954–1995)	$y = -2,53x + 369,1$	-2,5 *

*) statystycznie istotne dla $\alpha = 0,05$ – statistically significant for $\alpha = 0,05$

**) statystycznie istotne dla $\alpha = 0,02$ – statistically significant for $\alpha = 0,02$

➤ Temperatura powietrza

Najwyższe średnie wartości temperatury w okresie wegetacji w badanych wieloleciach wystąpiły w Bydgoszczy, najwyższą temperaturę średnią również odnotowano w tej stacji w roku 2003 i wynosiła ona 17,3°C (tab. 3). Najchłodniejszy okres wegetacji, biorąc pod uwagę wszystkie stacje, zanotowano w Łodzi w 1980 r. (12,5°C przy średniej z wielolecia wynoszącej 14,3°C). Łódź ogólnie charakteryzuje się najniższymi wartościami średnimi temperatury.

Okresy o ekstremalnych wartościach temperatury nie pokrywają się w czasie w badanych regionach. W okresie wegetacji w roku 1978 wystąpiła najniższa temperatura z wielolecia (13,3°C) we Wrocławiu, równie chłodno było w Łodzi (12,8°C), jednak w Gorzowie Wlkp. średnia temperatura wyniosła 13,5°C (była o 0,6°C wyższa od najniższej), a w Bydgoszczy 14,4°C (była o 1,5°C wyższa od najniższej). W roku 1992 okres wegetacji to czas najcieplejszy ze wspólnego wielolecia 1970–1995 w Gorzowie, Łodzi i Wrocławiu, natomiast w Bydgoszczy był chłodniejszy od najcieplejszego o 0,2°C.

Najcieplejsze okresy wegetacji pokrywają się z okresami o minimalnych (Wrocław, Łódź) lub bardzo niskich (Bydgoszcz, Gorzów Wlkp.) opadach. W Bydgoszczy zarówno temperatura, jak i opady wykazują największą zmienność ze wszystkich badanych stacji.

We wszystkich stacjach najchłodniejszym miesiącem okresu wegetacji pszenicy jarej był kwiecień (średnie wartości temperatury w wielolecia wahały się od 7,3°C w Łodzi do 8,2°C w Gorzowie w badanych wieloleciach). Najcieplejszym miesiącem, również we wszystkich stacjach, był lipiec ze średnią temperaturą od 17,8°C w Łodzi do 18,8°C w Bydgoszczy. Najwyższą średnią temperaturę lipca odnotowano w Bydgoszczy w 1994 r. i wyniosła ona 24,6°C. Rok 1994 wyróżniał się najcieplejszym lipcem na wszystkich badanych stacjach.

Tabela 3
Table 3

Podstawowe charakterystyki temperatury T (°C)
Basic characteristics of air temperature T (°C)

Stacja Station	\bar{T}	$T_{\max.}$	$T_{\min.}$	\bar{T}	$T_{\max.}$	$T_{\min.}$	s	A_s	$\bar{T}_{1970-1995}$
Okres – Period Wrocław-Swojec (1964–2000)	I–XII 8,7	I–XII 10,5	I–XII 7,3	IV–VIII 14,9	IV–VIII 16,9	IV–VIII 13,1	IV–VIII 0,84	IV–VIII 0,04	IV–VIII 14,8
Bydgoszcz (1946–2004)	8,7	12,0	6,8	15,2	17,3	12,9	0,91	-0,14	15,2
Gorzów Wlkp. (1970–1995)	*	*	*	14,6	16,6	12,9	0,85	0,22	14,6
Łódź (1954–1995)	*	*	*	14,3	16,3	12,5	0,88	0,06	14,4

\bar{T} – średnia temperatura w wieloletniu – mean air temperature in perennial,

$T_{\max.}$ – maksymalna temperatura w wieloletniu – maximal air temperature in perennial,

$T_{\min.}$ – minimalna temperatura w wieloletniu – minimal air temperature in perennial,

$\bar{T}_{1970-1995}$ – średnia temperatura w wieloletniu 1970–1995 – mean air temperature in 1970–1995,
pozostałe oznaczenia jak w tab.1 – the rest signs as in table 1.

Na podstawie średnich wartości temperatury z całego okresu kwiecień – sierpień wyznaczone zostały równania regresji liniowej oraz trendy zmian temperatury w badanych wieloletniach (tab. 4). We wszystkich rejonach odnotowano dodatnie trendy oznaczające wzrost średniej temperatury, a tym samym ocieplenie badanych obszarów. Zmiany te zachodziły w najszybszym tempie w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego oraz Wrocławia. Ponad dwukrotnie wolniej rosła temperatura w Bydgoszczy oraz Łodzi.

Tabela 4
Table 4

Równania trendów liniowych dla średnich temperatur w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) na czterech stacjach pomiarowych
Linear regression equation for air temperature in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) at four observatories

Stacja Station	Równanie regresji Regression equation	Tendencje (°C·rok ⁻¹) Tendency (°C·rok ⁻¹)
Wrocław-Swojec (1964–2000)	$y = 0,035x + 14,2$	0,035 *
Bydgoszcz (1946–2004)	$y = 0,016x + 14,7$	0,016 *
Gorzów Wlkp. (1970–1995)	$y = 0,047x + 13,9$	0,047 *
Łódź (1954–1995)	$y = 0,019x + 13,9$	0,019 **

*) statystycznie istotne dla $\alpha = 0,05$ – statistically significant for $\alpha = 0,05$

**) statystycznie istotne dla $\alpha = 0,1$ – statistically significant for $\alpha = 0,1$

➤ Ciśnienie pary wodnej

Podstawowe charakterystyki statystyczne dla średnich wieloletnich wartości dekadowych ciśnienia pary wodnej we wszystkich badanych rejonach przedstawia tabela 5.

W roku 1992, o niskich opadach, ciśnienie pary wodnej było niższe od przeciętnego w Bydgoszczy, Gorzowie i Wrocławiu. Jedynie w Łodzi przy najniższej sumie opadów średnie ciśnienie pary wodnej wyniosło 12,3 hPa i było o 0,4 hPa wyższe od przeciętnego. W okresach o najwyższych opadach średnie ciśnienie pary wodnej oscylowało wokół wartości przeciętnej.

Ciśnienie pary wodnej w atmosferze przyjmowało wartości najniższe na początku okresu wegetacji. W kolejnych dekadach wartości rosły, osiągając maksimum na przełomie lipca i sierpnia. W końcu sierpnia ciśnienie pary wodnej znów malało.

Tabela 5
Table 5

Podstawowe charakterystyki dla ciśnienia pary wodnej e w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) (hPa)
Basic characteristics of vapour pressure in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) (hPa)

Stacja Station	\bar{e}	$e_{\max.}$	$e_{\min.}$	s	As	$\bar{e}_{1970-1995}$
Wrocław-Swojec	12,3	13,2	11,3	0,55	-0,26	12,2
Bydgoszcz	11,9	13,4	10,5	0,56	0,06	11,6
Gorzów Wlkp.	12,6	13,6	11,4	0,64	-0,41	12,6
Łódź	11,8	13,3	10,5	0,62	-0,02	12,1

\bar{e} – średnie ciśnienie pary wodnej w wieloleciu – mean vapour pressure,
 $e_{\max.}$ – maksymalne ciśnienie pary wodnej w wieloleciu – maximal vapour pressure,
 $e_{\min.}$ – minimalne ciśnienie pary wodnej w wieloleciu – minimal vapour pressure,
 $\bar{e}_{1970-1995}$ – średnie ciśnienie pary wodnej w wieloleciu 1970–1995 – mean vapour pressure in 1970–1995,
pozostałe oznaczenia jak w tabeli 1 – the rest signs as in table 1.

➤ Usłonecznienie

Usłonecznienie rzeczywiste przedstawia liczbę godzin ze Słońcem mierzonych za pomocą heliografu. W pracy wykorzystywane są dekadowe sumy usłonecznienia (tab. 6).

Tabela 6
Table 6

Podstawowe charakterystyki sum usłonecznienia S w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) (h)
Basic characteristics of sunshine hours S in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) (h)

Stacja Station	\bar{S}	$S_{\max.}$	$S_{\min.}$	s	As	$\bar{S}_{1970-1995}$
Wrocław-Swojec	937,4	1179,7	683,8	141,1	0,14	920,8
Bydgoszcz	997,8	1250,0	655,0	126,6	-0,50	969,1
Gorzów Wlkp.	1026,0	1233,0	812,0	139,2	-0,01	1026,0
Łódź	1027,5	1299,0	733,5	138,0	-0,22	1095

\bar{S} – średnia suma usłonecznienia z w wieloleciu – mean S ,
 $S_{\max.}$ – maksymalna suma usłonecznienia w wieloleciu – maximal S ,
 $S_{\min.}$ – minimalna suma usłonecznienia w wieloleciu – minimal S ,
 $\bar{S}_{1970-1995}$ – średnie usłonecznienie w wieloleciu 1970–1995 – mean S in 1970–1995,
pozostałe oznaczenia jak w tabeli 1 – the rest signs as in table 1.

Średnie sumy usłonecznienia z okresu wegetacji pszenicy jarej wahały się od 937,4 h we Wrocławiu do 1027,5 h w Łodzi, w badanych wieloletniach (tab. 6). Na uwagę zasługuje istotna różnica między średnią wartością w Łodzi dla całego wielolecia 1954–1995 a wspólnym wieloleciem wszystkich stacji 1970–1995. Oznacza to, że wielolecie 1954–1969 było zdecydowanie mniej „słoneczne” niż lata późniejsze. Faktycznie w okresie 1954–1969 największe średnie usłonecznienie wynosiło 1137 h, w latach późniejszych wartość ta została przekroczona 9 razy.

We wszystkich stacjach niski opad występował w latach o wysokiej temperaturze i wysokich sumach usłonecznienia.

➤ Prędkość wiatru

Najmniejszą prędkość wiatru odnotowano w Bydgoszczy (tab. 7), gdzie zarówno średnia prędkość wiatru z wielolecia, jak i wartość minimalna oraz maksymalna były najniższe. Najsilniejsze wiatry występowały w Łodzi, gdzie w 1969 r. średnia prędkość wiatru wyniosła $7,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. W Łodzi również największa była średnia oraz minimalna wartość prędkości.

Tabela 7

Table 7

Podstawowe charakterystyki prędkości wiatru v w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Basic characteristics of wind speed in the vegetation period of spring wheat (IV–VIII) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Stacja Station	\bar{v}	v_{\max}	v_{\min}	s	As	$\bar{v}_{1970-1995}$
Wrocław-Swojec	3,2	4,3	2,6	0,55	0,64	3,2
Bydgoszcz	1,9	3,0	1,0	0,51	0,31	1,9
Gorzów Wlkp.	3,2	3,9	2,2	0,4	-0,76	3,2
Łódź	3,6	7,0	2,8	0,67	3,4	3,4

\bar{v} – średnia prędkość wiatru w wieloleciu – mean wind speed,

v_{\max} – maksymalna prędkość wiatru w wieloleciu – maximal wind speed,

v_{\min} – minimalna prędkość wiatru w wieloleciu – minimal wind speed,

$\bar{v}_{1970-1995}$ – średnia prędkość wiatru w wieloleciu 1970–1995 – mean wind speed in 1970–1995,

pozostałe oznaczenia jak w tabeli 1 – the rest signs as in table 1.

5.2. Ewapotranspiracja wskaźnikowa (ET_o)

Wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wyznaczono metodą Penmanna omówioną w rozdziale 4.2. Wyrażają one możliwości atmosfery do wchłonięcia pary wodnej. Poniżej przedstawiono porównanie wartości podstawowych statystyk dla sum z okresu wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w objętych badaniami czterech regionach Polski (tab. 8).

Tabela 8

Table 8

Podstawowe charakterystyki ewapotranspiracji wskaźnikowej ETP w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) (mm)

Basic statistical characteristics of reference evapotranspiration in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) (mm)

Stacja Station	\overline{ET}_o	$\overline{ET}_{o\max.}$	$\overline{ET}_{o\min.}$	S	As	$\overline{ET}_{o1970-1995}$
Wrocław-Swojec (1964–2000)	500,0	605,3	420,8	40,7	0,22	497,0
Bydgoszcz (1946–2004)	434,5	512,0	349,3	34,6	0,12	440,4
Gorzów Wlkp. (1970–1995)	476,9	624,9	384,6	60,5	0,53	476,9
Łódź (1954–1995)	504,8	590,1	419,5	42,3	0,27	498,0

\overline{ET}_o – średnia wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciu – mean of reference evapotranspiration,

$\overline{ET}_{o\max.}$ – maksymalna wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciu – maximal reference evapotranspiration,

$\overline{ET}_{o\min.}$ – minimalna wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciu – minimal reference evapotranspiration,

S – odchylenie standardowe ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciu – standard deviation of reference evapotranspiration,

As – współczynnik skośności ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciu – skewness of reference evapotranspiration,

$\overline{ET}_{o1970-1995}$ – średnia wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej w wieloleciu 1970–1995 – mean of reference evapotranspiration in 1970–1995.

Największe przeciętne możliwości atmosfery do przyjęcia pary wodnej odnotowano w Łodzi, bez względu na rozważane wielolecie. Najwyższą wartość z jednego okresu wegetacji IV–VIII odnotowano w 1992 r. o bardzo niskich opadach (170 mm) w Gorzowie Wielkopolskim. Tam też, mimo krótkiego okresu badawczego liczącego zaledwie 26 lat, stwierdzono najwyższe zróżnicowanie wartości ET_o związane z dużą zmiennością opadów i najsilniejszą asymetrią prawostronną wskazującą na występowanie skrajnie wysokich wartości. Wysokie wartości ET_o są wynikiem dużego niedosytu wilgotności połączonego z wysoką temperaturą i niskimi opadami. Warunki te zostały spełnione w latach 1982, 1989 oraz 1992: opad wyniósł 153,6 mm, 190,9 mm, 170,0 mm odpowiednio, średnie ciśnienie pary wodnej nie przekroczyło 12 hPa, a średnia temperatura z okresu wegetacji pszenicy przewyższała 15°C.

Dla rozważanych regionów przeprowadzono badanie zmian wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej w analizowanym wieloleciu (tab. 9).

Tabela 9
Table 9

Równania trendów liniowych sum ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) na czterech stacjach pomiarowych

Linear regression equation of reference evapotranspirations sums in the vegetation period of spring wheat (IV–VIII) at for observatories

Stacja Station	Równanie regresji Regression equation	Tendencje (mm·rok ⁻¹) Tendency (mm·rok ⁻¹)
Wrocław-Swojec (1964–2000)	$y = 1,25x + 476,3$	1,25 *
Bydgoszcz (1946–2004)	$y = -0,17x + 439,7$	-0,17
Gorzów Wlkp. (1970–1995)	$y = 4,68x + 413,8$	4,68*
Łódź (1954–1995)	$y = -0,08x + 506,5$	-0,08

* statystycznie istotne dla $\alpha = 0,05$ – statistically significant for $\alpha = 0,05$

Istotnie statystycznie okazały się jedynie trendy rosnące ewapotranspiracji wskaźnikowej w okolicach Wrocławia i Gorzowa Wielkopolskiego. Oznacza to zdolność atmosfery do przyjmowania coraz większych ilości pary wodnej.

5.3. Klimatyczny bilans wodny w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII)

Wartości klimatycznego bilansu wodnego zostały wyznaczone dla wszystkich dekad z okresów wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) dla odpowiednich wieloleci w czterech badanych regionach.

5.3.1. Gorzów Wielkopolski

W Gorzowie Wielkopolskim badaniami objęto okresy wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1970–1995. Pierwszym etapem badań był opis zmienności średnich wieloletnich sum dekadowych ewapotranspiracji wskaźnikowej, opadów atmosferycznych oraz klimatycznych bilansów wodnych na tle wartości maksymalnych i minimalnych wymienionych elementów.

Poniżej zostały przedstawione wartości podstawowych parametrów statystycznych wyznaczonych dla każdej z dekad okresu wegetacji w ciągu całego wielolecia 1970–1995 dla ewapotranspiracji wskaźnikowej, opadu oraz klimatycznego bilansu wodnego.

Średnie dekadowe sumy z wielolecia ewapotranspiracji wskaźnikowej przyjmują najniższe wartości na początku okresu wegetacji (16,9 mm), a najwyższe na przełomie lipca i sierpnia (40,3 mm). Najbardziej wyrównane wartości ewapotranspiracji występowały w kwietniu (pierwsza i druga dekada), czego dowodem są najniższe wartości

odchylenia standardowego. Największe wahania wartości ET_0 występują w lipcu, a szczególnie w jego ostatniej dekadzie (odchylenie wynosi 11,1 mm, a amplituda 41,5 mm). Możliwości atmosfery do przyjmowania pary wodnej były najwyższe w lipcu, o czym świadczą najwyższe wartości zarówno średnie, jak i ekstremalne ET_0 . Dodatnie wartości współczynnika skośności (tab. 10) wskazują na asymetrię prawostronną, co oznacza, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej dla większości lat w poszczególnych dekadach (oprócz drugiej dekady sierpnia) były niższe od wartości średnich.

Tabela 10
Table 10

Podstawowe charakterystyki ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_0 (mm) w wieloleciu 1970–1995 w Gorzowie Wielkopolskim
Basic characteristics of reference evapotranspiration ET_0 (mm) in Gorzów Wielkopolski 1970–1995

ET_0	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	16,9	27,0	11,0	4,3	0,45	16,8
2 IV	21,3	34,8	13,5	5,0	0,79	21,0
3	25,0	25,6	13,8	7,8	1,85	22,6
m	63,2	97,5	43,3	12,1	0,59	61,4
1	29,5	41,5	18,7	6,8	0,19	28,5
2 V	32,1	51,5	13,2	7,8	0,05	33,3
3	36,0	57,6	23,4	8,9	0,48	34,5
m	97,6	123,8	69,6	14,7	0,14	97,0
1	33,5	61,5	19,1	9,3	1,10	33,3
2 VI	32,5	46,3	21,6	6,6	0,21	33,3
3	34,3	51,6	20,7	8,7	0,24	32,9
m	100,4	152,8	74,6	17,9	0,86	98,7
1	39,5	55,8	23,6	9,4	0,06	38,2
2 VII	35,4	54,1	22,4	7,9	0,49	35,0
3	40,3	66,5	25,0	11,1	0,61	39,8
m	115,2	168,8	77,7	24,6	0,47	113,1
1	36,7	57,4	23,8	8,7	0,94	33,5
2 VIII	32,8	45,7	20,8	6,6	-0,03	33,4
3	31,2	41,6	21,3	6,0	0,04	31,9
m	100,6	132,4	74,9	15,6	0,09	95,5
IV–VIII	476,9	624,9	384,6	60,4	0,53	462,2

Średnie dekadowe sumy opadów w okresie wegetacji podlegają dużym i dość nieregularnym wahaniom. Najwyższą średnią wartość opadu odnotowano w drugiej dekadzie lipca (26,2 mm), ale najwyższa dekadowa suma opadów była w pierwszej dekadzie sierpnia 1977 r. (116,6 mm) (tab. 11). Najniższe opady występują w kwietniu oraz na początku maja, wtedy również ich zróżnicowanie jest najmniejsze. Sumy opadów w kolejnych dekadach obserwowane przez całe wielolecie wykazują, że empiryczny

rozkład tej cechy ma silną asymetrię prawostronną (skośność od 0,73 do 2,52), co wskazuje na występowanie wartości mniejszych od średnich w co najmniej 14 dekadach z badanego 26-letniego wielolecia. Potwierdzeniem tego są wartości mediany niższe od średnich w każdym okresie. Miesięczne sumy opadów wykazują podobne własności, jednak o znacznie mniejszym nasileniu, jedynie dla sierpnia skośność wyniosła 1,22 i była porównywalna z wartościami dekadowymi (tab. 12).

Bezpośrednią konsekwencją zmienności opadów oraz ewapotranspiracji są wartości klimatycznego bilansu wodnego.

Tabela 11
Table 11

Podstawowe charakterystyki opadu (mm) w wieloleciu 1970–1995 w Gorzowie Wielkopolskim
Basic characteristics of precipitation P (mm) in Gorzów Wielkopolski 1970–1995

P	średnia mean	max	min	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	14,5	60,3	0,0	12,9	1,77	14,8
2 IV	11,8	64,5	0,1	14,6	2,37	6,8
3	13,0	47,9	0,0	13,7	1,24	6,8
M	39,4	88,0	6,4	23,9	0,63	31,8
1	11,7	43,7	0,0	10,0	1,39	10,0
2 V	16,1	72,3	0,0	16,6	1,91	12,0
3	19,3	54,1	0,0	15,6	0,79	13,6
m	47,1	81,7	10,8	19,2	0,21	41,7
1	24,8	109,4	0,0	24,7	1,97	18,8
2 VI	24,4	70,8	0,3	20,1	1,01	20,3
3	19,8	104,9	0,0	24,6	2,06	9,2
m	69,0	134,1	7,0	36,5	0,23	61,5
1	16,2	49,5	0,0	14,3	0,73	10,0
2 VII	26,2	93,9	0,7	24,6	1,44	19,8
3	18,3	85,1	0,0	21,1	1,73	11,7
m	60,7	113,0	13,9	33,1	0,23	53,3
1	20,7	116,6	0,0	25,5	2,52	12,6
2 VIII	15,0	54,0	0,0	15,8	1,12	9,6
3	14,5	63,0	0,0	15,0	1,62	9,0
m	50,2	149,9	8,5	23,5	1,22	47,7
IV–VIII	266,3	460,0	153,6	68,2	0,75	256,4

Podczas całego okresu wegetacji pszenicy średnie dekadowe sumy KBW są ujemne. Największe deficyty wody obserwuje się w lipcu, kiedy ewapotranspiracja jest najwyższa. Biorąc pod uwagę wartości klimatycznego bilansu wodnego, najbardziej zróżnicowanym miesiącem jest czerwiec, o czym świadczą największe wartości odchylenia standardowego zarówno dla poszczególnych dekad, jak i dla całego miesiąca. Na uwagę zasługuje fakt, że żaden maj, spośród 26 przebadanych, nie cechował się dodatnim klimatycznym bilansem wodnym, a większe niedobory wody wystąpiły jedynie w lipcu.

Współczynniki skośności dla wszystkich dekad są dodatnie, co oznacza prawostronną asymetrię KBW. Podobnie zachowują się opady i ewapotranspiracja wskaźnikowa. Jednak dla sum miesięcznych sytuacja jest nieco inna, trzy spośród pięciu badanych (V, VI, VII) wykazują asymetrię lewostronną, czyli większość miesięcy (np. lipców) charakteryzowała się mniejszymi niedoborami niż przeciętnie (odpowiednio 54,5 mm). Sytuację tę tłumaczy fakt, że sumy miesięczne są mniej wrażliwe na wartości skrajne wynikające z bardzo wysokich opadów, a silnie reagują na niskie opady.

Tabela 12

Table 12

Podstawowe charakterystyki klimatycznego bilansu wodnego (mm) w wieloleciu

1970–1995 w Gorzowie Wielkopolskim

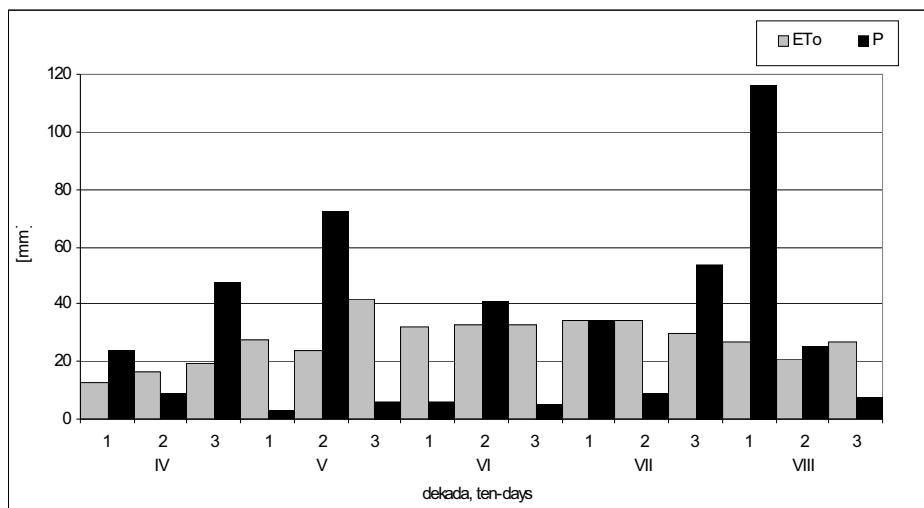
Basic characteristics of climatic water balance KBW (mm)

in Gorzów Wielkopolski 1970–1995

KBW	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	-2,4	46,8	-27,0	15,9	1,04	-3,0
2 IV	-9,5	29,7	-29,3	14,4	1,33	-12,9
3	-12,0	28,4	-52,6	19,4	0,46	-17,1
m	-23,8	44,7	-36,2	31,7	0,24	-28,2
1	-17,9	23,4	-36,2	15,4	0,84	-21,4
2 V	-15,9	48,8	-51,5	21,6	1,24	-19,9
3	-16,7	30,4	-54,6	23,0	0,46	-23,1
m	-50,5	-0,8	-106,0	29,4	-0,08	-45,3
1	-8,7	85,3	-59,5	31,2	1,22	-14,8
2 VI	-8,1	45,8	-45,2	24,2	0,69	-9,1
3	-14,6	78,0	-48,1	30,3	1,47	-21,7
m	-31,3	54,6	-145,8	51,3	-0,12	-30,1
1	-23,3	22,0	-55,8	20,6	0,3	-24,3
2 VII	-9,2	58,5	-49,1	28,0	0,99	-15,0
3	-22,0	55,1	-66,5	29,1	0,87	-26,9
m	-54,5	19,9	-133,3	49,9	-0,08	-52,8
1	-16,0	89,4	-51,8	30,4	1,87	-21,3
2 VIII	-17,8	29,9	-42,5	20,2	0,82	-23,7
3	-16,7	22,9	-41,6	16,9	0,62	-19,6
m	-50,5	75,0	-99,0	41,9	1,35	-61,2
IV–VIII	-216,6	48,2	-454,9	116,0	0,18	-222,0

➤ Charakterystyka lat o ekstremalnych sumach opadów w Gorzowie Wielkopolskim

Interesująca wydaje się charakterystyka zmienności wartości składowych klimatycznego bilansu wodnego w latach o najwyższych i najniższych sumach opadów, dlatego kolejnym etapem badań była analiza lat o ich ekstremalnych sumach w Gorzowie Wlkp.



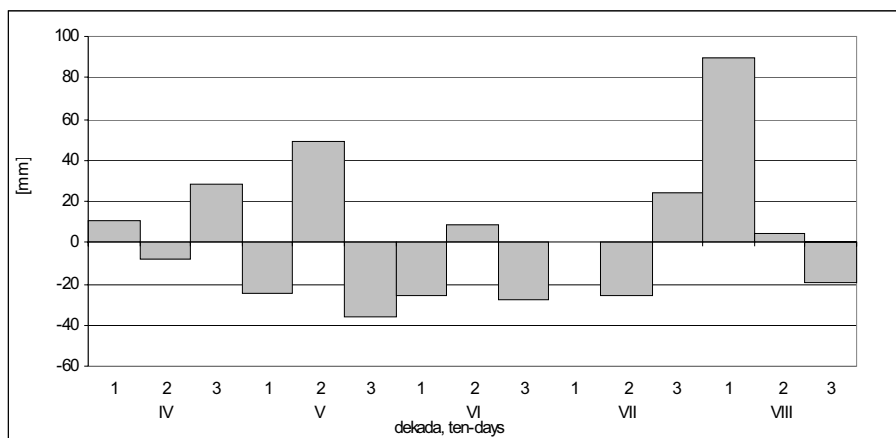
Rys. 1. Dekadowe sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_0 i opadów P w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1977 o najwyższej sumie opadów (460 mm) w Gorzowie Wielkopolskim

Fig. 1. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1977 with the biggest precipitation (460 mm) in Gorzów Wielkopolski

W 1977 roku w Gorzowie Wielkopolskim odnotowano najwyższą sumę opadów w okresie IV–VIII z wielolecia 1970–1995 wynoszącą 460 mm. Opady były rozłożone bardzo nierównomiernie w ciągu okresu wegetacji pszenicy (rys. 1). Dekady o wysokich sumach opadów (48, 72, 41, 34, 53, 117 mm) przeplatały się z dekadami o niskich opadach (rys. 1). W siedmiu dekadach opad nie przekroczył 10 mm, a w pierwszej dekadzie sierpnia wyniósł 117 mm. W omawianym okresie wegetacji odnotowano niskie wartości sum usłonecznienia: od 26 do 77 godz. z wyjątkiem trzeciej dekady maja, kiedy suma ta wyniosła 117 godzin. Wysoka suma usłonecznienia związana była z niskim opadem (5,8 mm) oraz niskim ciśnieniem pary wodnej (8,8 hPa), a co za tym idzie – najwyższą sumą ewapotranspiracji w całym okresie (41 mm).

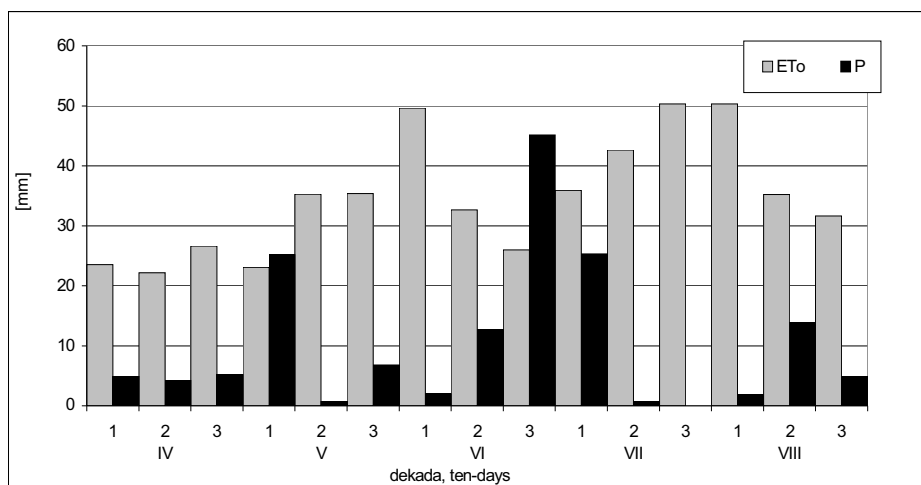
Niewielka zmienność wartości ewapotranspiracji przy dużych różnicach sum opadów w poszczególnych dekadach powoduje duże zróżnicowanie wartości klimatycznego bilansu wodnego (rys. 2). W dekadach o wysokich opadach KBW przyjmuje wartości dodatnie do 89 mm, a w dekadach o niskich opadach niedobory wody wynosiły nawet 36 mm. W 9 dekadach klimatyczny bilans wodny przyjmował wartości wyższe

od przeciętnych, a w 6 dekadach niższe. Pomimo tego że okres wegetacji pszenicy jarej 1977 r. charakteryzował się najwyższą sumą opadów w wieloleciu 1970–1995, to tylko w 7 dekadach klimatyczny bilans wodny był dodatni, natomiast w pozostałych dekadach okresu wegetacji KBW był ujemny.



Rys. 2. Dekadowe sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1977 o najwyższej sumie opadów (460 mm) w Gorzowie Wielkopolskim

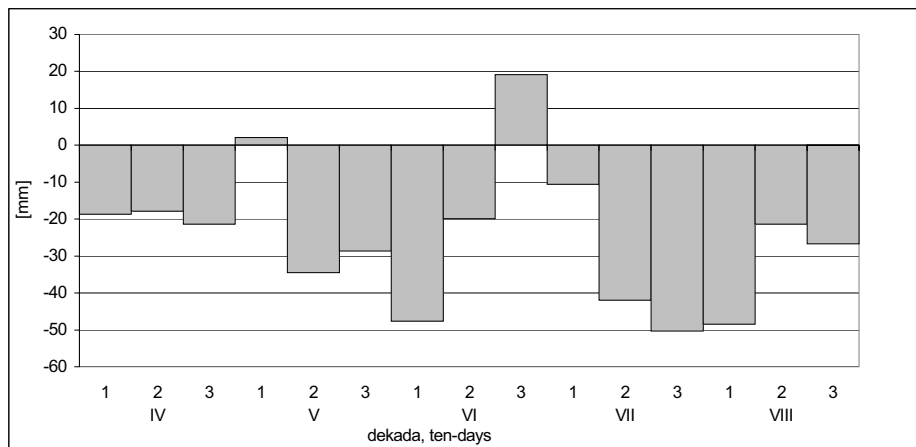
Fig. 2. Ten-days climatic water balance in vegetation season of spring wheat in year 1977 with the biggest precipitation (460 mm) in Gorzów Wielkopolski



Rys. 3. Dekadowe sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej, w roku 1982 o najniższej sumie opadów (154 mm) w Gorzowie Wielkopolskim

Fig. 3. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1982 with the lowest precipitation (154 mm) in Gorzów Wielkopolski

W roku 1982 o niskiej sumie opadów – wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej były znacznie wyższe niż w roku o wysokich opadach i podlegały znacznym wahaniom, od 22 mm w drugiej dekadzie kwietnia do 50 mm na przełomie lipca i sierpnia (rys. 3). W 13 dekadach sumy ET_0 były wyższe od przeciętnej (nawet o 105% w pierwszej dekadzie czerwca). Jedynie w drugiej dekadzie kwietnia oraz w pierwszej dekadzie maja ewapotranspiracja była nieznacznie niższa od przeciętnej (o 9%). Przewyższenie wartości średnich ET_0 jest najbardziej widoczne w okresie od połowy maja do początku sierpnia (rys. 3). Opad, choć niski, rozłożony był nierównomiernie, jednak w związku z ogólnie niskimi sumami zróżnicowanie w kolejnych dekadach było znacznie mniejsze (amplituda 45 mm) niż w roku o wysokich opadach (amplituda 114 mm).



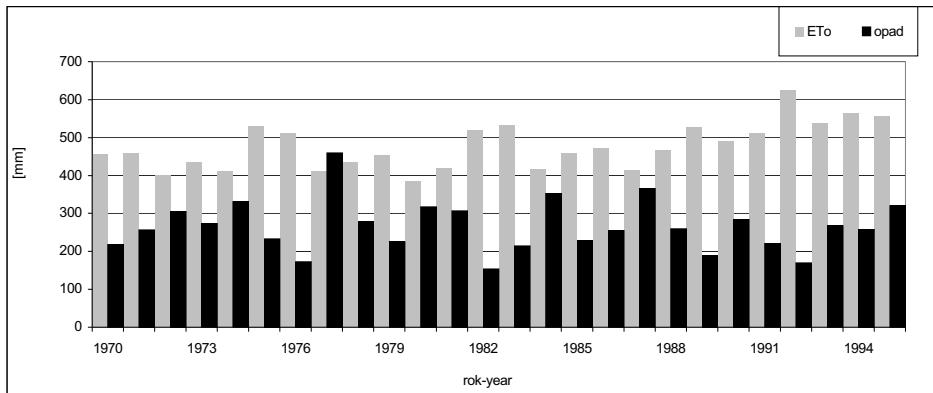
Rys. 4. Dekadowe sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej, w 1982 roku o najniższej sumie opadów (154 mm) w Gorzowie Wielkopolskim

Fig. 4. Ten-days climatic water balance in vegetation season of spring wheat in year 1982 with the lowest precipitation (154 mm) in Gorzów Wielkopolski

W większości dekad okresu wegetacji pszenicy jarej w roku o najniższej sumie opadów klimatyczny bilans wodny miał wartości ujemne (rys. 4). Jedynie w dwóch dekadach o najwyższych sumach opadów bilans był dodatni (19 i 2 mm).

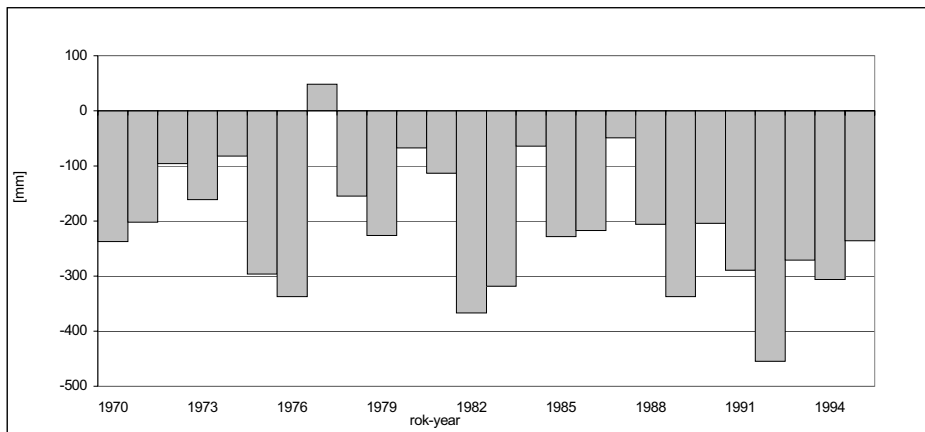
Omówione powyżej okresy wegetacji, w szczególności rok 1977, ze względu na osiąganie ekstremalnych wartości wysokości opadu wyróżniają się spośród pozostałych lat badanego wielolecia (rys. 5).

Największą sumę ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacji pszenicy jarej w Gorzowie Wlkp. odnotowano w 1992 r. (624,9 mm), przy opadzie wynoszącym 170 mm. Najniższą wartość ewapotranspiracji wynoszącą 384 mm zarejestrowano w 1980 r., przy opadzie równym 317,1 mm (rys. 6).



Rys. 5. Sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1970–1995 w Gorzowie Wielkopolskim

Fig. 5. Reference evapotranspiration and precipitation sums in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1970–1995 in Gorzów Wielkopolski



Rys. 6. Sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1970–1995 w Gorzowie Wielkopolskim

Fig. 6. Climatic water balance in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1970–1995 in Gorzów Wielkopolski

Klimatyczny bilans wodny w badanym wieloleciu (1970–1995) w Gorzowie Wielkopolskim miał ujemne wartości w 25 badanych okresach, natomiast jest dodatni (48,2 mm) tylko w okresie wegetacji o maksymalnym opadzie, czyli 1977 roku. Najniższą wartość KBW (-454,9 mm) odnotowano w 1992 r. charakteryzującym się bardzo niskimi opadami i najwyższą ewapotranspiracją. Amplituda KBW wynosi 503 mm.

5.3.2. Łódź

Charakterystykę tego regionu rozpoczyna omówienie średnich wartości składowych klimatycznego bilansu wodnego w poszczególnych dekadach okresu wegetacji pszenicy jarej w całym wieloleciu 1954–1995, opisanych za pomocą podstawowych parametrów statystycznych.

Tabela 13

Table 13

Podstawowe charakterystyki ewapotranspiracji wskaźnikowej (mm) w wieloleciu 1954–1995 w Łodzi
Basic characteristics of reference evapotranspiration ETP (mm) in Łódź 1954–1995

ET ₀	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	19,3	30,8	10,0	5,0	0,22	19,3
2 IV	22,5	33,5	14,2	5,3	0,42	20,7
3	26,4	43,2	18,0	5,9	0,91	25,3
m	68,2	93,9	53,7	9,8	0,75	66,6
1	30,2	47,6	19,8	6,0	0,56	29,3
2 V	34,2	60,8	21,1	8,6	0,89	34,8
3	37,3	53,4	27,1	6,8	0,63	36,2
m	101,7	127,3	73,5	12,8	-0,12	102,2
1	37,0	55,4	23,4	6,8	0,60	35,8
2 VI	37,0	56,5	23,9	7,0	0,67	35,7
3	37,1	55,4	22,7	8,4	0,27	36,9
m	111,1	141,9	78,3	15,5	-0,06	113,6
1	39,5	58,4	26,7	8,6	0,53	39,1
2 VII	38,8	56,3	28,0	7,0	0,76	37,1
3	40,8	68,4	24,3	10,2	0,75	38,7
m	119,1	154,6	83,8	16,4	0,18	116,6
1	39,3	53,7	26,1	7,2	0,46	36,9
2 VIII	33,6	47,1	23,0	6,4	0,23	32,7
3	32,4	46,9	20,6	5,9	0,10	32,0
m	105,3	132,8	64,8	14,3	-0,2	109,0
IV–VIII	504,8	590,1	419,5	42,3	0,27	502,0

Ewapotranspiracja wskaźnikowa jest najniższa na początku okresu wegetacji (tab. 13). Rozwój szaty roślinnej zbiega się w czasie ze wzrostem możliwości atmosfery do przyjmowania wilgoci, która osiąga największe wartości średnie oraz maksymalne w ostatnich dekadach lipca. Zarówno najniższe wartości ET₀, jak i najmniejsze zróżnicowanie występują dla wszystkich dekad kwietnia, czego konsekwencją jest najniższa średnia suma miesięczna ewapotranspiracji wskaźnikowej w tym miesiącu. Dla wszystkich badanych dekad mediana nie przekracza wartości średniej, czego skutkiem są dodatnie wartości współczynnika skośności wskazujące na asymetrię prawostronną, co oznacza,

że większość dekad cechuje się ewapotranspiracją niższą od przeciętnej dla danej dekad. W maju, czerwcu i sierpniu otrzymano medianę wyższą od średniej, a co za tym idzie – asymetrię lewostronną.

Podobną analizę przeprowadzono dla opadów podczas kolejnych dekad okresu od kwietnia do sierpnia (tab. 14).

Tabela 14
Table 14

Podstawowe charakterystyki opadu (mm) w wieloleciu 1954–1995 w Łodzi
Basic characteristics of precipitation P (mm) in Łódź 1954–1995

P	średnia mean	max	min	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	13,4	61,0	0,0	12,2	1,66	11,5
2 IV	11,9	55,8	0,0	12,3	1,68	8,3
3	13,2	51,3	0,0	11,8	1,45	11,2
m	38,4	99,4	4,3	20,6	1,05	33,3
1	13,9	38,7	0,0	10,8	0,67	11,2
2 V	20,6	78,4	0,0	17,9	1,31	17,3
3	19,9	50,6	0,0	14,1	0,56	19,5
m	54,4	147,2	14,5	26,4	1,17	49,4
1	20,7	91,0	0,0	19,4	1,68	15,5
2 VI	23,8	125,3	0,0	21,5	2,75	19,6
3	25,6	120,0	0,0	24,2	1,66	21,1
m	70,2	219,6	17,0	38,0	1,75	61,6
1	25,1	75,7	0,0	19,6	0,81	25,2
2 VII	28,9	136,6	0,0	28,4	1,95	23,1
3	30,2	122,0	0,0	28,9	1,68	25,2
m	84,2	217,7	10,8	46,4	1,20	69,8
1	26,1	125,0	0,0	22,6	2,60	17,2
2 VIII	23,0	80,2	0,2	18,8	1,10	15,8
3	23,0	92,4	0,0	22,0	1,47	17,1
m	72,1	188,6	13,9	35,5	1,21	56,9
IV–VIII	312,4	476,7	134,5	74,6	0,15	310,4

Dekadowe sumy opadów przyjmowały najniższe wartości w kwietniu (średnio 38,4 mm). W kolejnych dekadach sumy opadów sukcesywnie rosły do maksimum w trzeciej dekadzie lipca wynoszącego 30,2 mm. W sierpniu obserwuje się ponowny spadek sum opadów. Najbardziej regularne opady występują w kwietniu i maju, a zmienność ich wzrasta wraz z kolejnymi dekadami aż do końca lipca. Fakt ten znajduje potwierdzenie w rosnących od kwietnia do końca lipca wartościach odchylenia standardowego (od 11,8 do 28,9) oraz amplitudach dekadowych (od 51,3 do 136,6 mm). Dla każdej dekad, miesiąca oraz całego okresu wegetacji współczynniki skośności są dodatnie, co oznacza, że większość sum opadowych dla każdej z dekad oraz każdego miesiąca była niższa od odpowiedniej wartości średniej. Jest to spowodowane występowaniem obfitych, choć rzadko występujących opadów, powodujących wzrost wartości średniej.

Ponieważ średnie wartości ewapotranspiracji dla każdej z rozważanych dekad oraz każdego miesiąca przekraczają odpowiednie wartości opadów, średnie wartości klimatycznego bilansu wodnego są wszędzie ujemne (tab. 15).

Tabela 15
Table 15

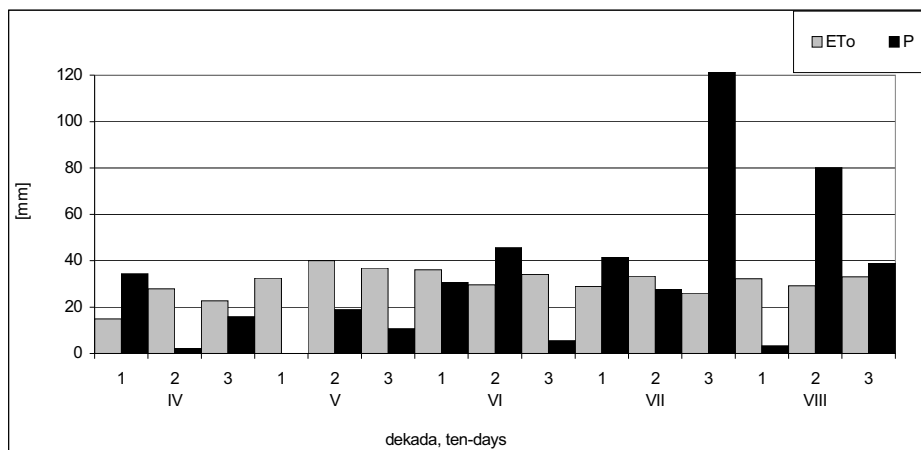
Basic characteristics of climatic water balance KBW (mm) in Łódź 1954–1995
Podstawowe charakterystyki klimatycznego bilansu wodnego (mm) w wieloleciu
1954–1995 w Łodzi

KBW	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	-5,9	40,7	-30,4	14,6	0,77	-7,1
2 IV	-10,6	41,3	-30,7	15,7	1,18	-10,7
3	-13,2	29,1	-42,8	14,8	0,55	-14,8
m	-29,8	43,3	-66,7	25,6	0,62	-32,8
1	-16,3	13,4	-45,9	14,0	0,32	-18,6
2 V	-13,6	51,9	-56,0	23,0	0,78	-17,9
3	-17,4	22,4	-48,5	17,9	0,31	-17,5
m	-47,3	73,8	-97,3	33,3	1,28	-54,5
1	-16,3	56,6	-51,6	22,7	1,19	-21,7
2 VI	-13,2	94,0	-56,5	24,5	2,04	-16,3
3	-11,5	84,8	-55,4	29,5	0,90	-14,5
m	-41,0	126,9	-115,8	45,3	1,15	-45,0
1	-14,3	48,1	-58,4	25,7	0,45	-14,5
2 VII	-9,9	99,6	-55,5	31,3	1,41	-16,2
3	-10,6	95,3	-63,0	35,8	1,32	-16,9
m	-34,8	102,2	-140,5	56,8	0,62	-43,2
1	-17,7	98,9	-53,7	26,6	2,10	-21,6
2 VIII	-10,7	51,1	-43,3	23,2	0,73	-12,4
3	-9,3	66,9	-41,0	25,4	1,16	-13,4
m	-37,7	96,6	-118,9	43,0	0,79	-40,8
IV–VIII	-192,4	38,9	-444,9	105,5	0,01	-202,6

Największe niedobory oznaczone najniższymi wartościami klimatycznego bilansu wodnego występują w maju, a najmniejsze w kwietniu. Dla każdej dekady oraz miesiąca przynajmniej w jednym roku opad przekroczył ewapotranspirację wskaźnikową, na co wskazują dodatnie wartości maksymalne KBW. Wśród rozważanych składowych klimatycznego bilansu wodnego najmniejszą zmiennością charakteryzuje się ewapotranspiracja (dla okresu IV–VIII $s = 42,3$), a największą klimatyczny bilans wodny (dla okresu IV–VIII $s = 105,5$). We wszystkich rozważanych okresach (tab. 15) wystąpiła, podobnie jak dla opadów, asymetria prawostronna.

➤ Charakterystyka lat o ekstremalnych sumach opadów w Łodzi

Poniżej została przedstawiona analiza zmienności wartości składowych klimatycznego bilansu wodnego w latach o najwyższej (1960) oraz najniższej (1992) sumie opadów z okresu IV–VIII.

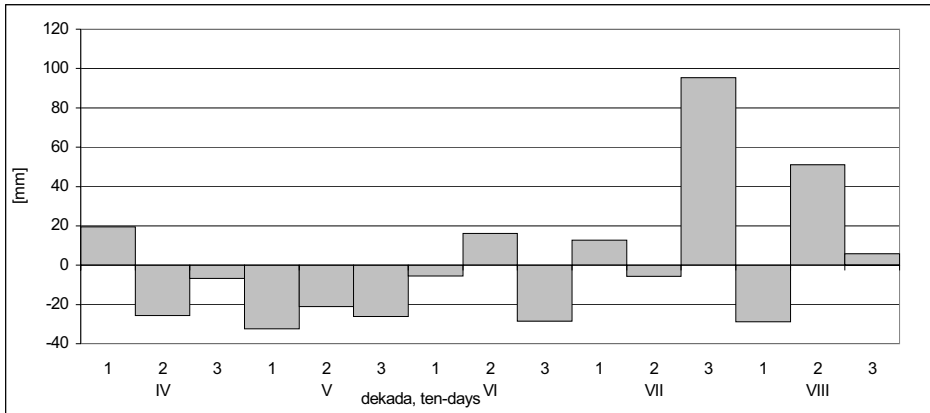


Rys. 7. Sumy dekadowe ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej, w roku 1960 o najwyższej sumie opadów (477 mm) w Łodzi

Fig. 7. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1960 with the biggest precipitation (477 mm) in Łódź

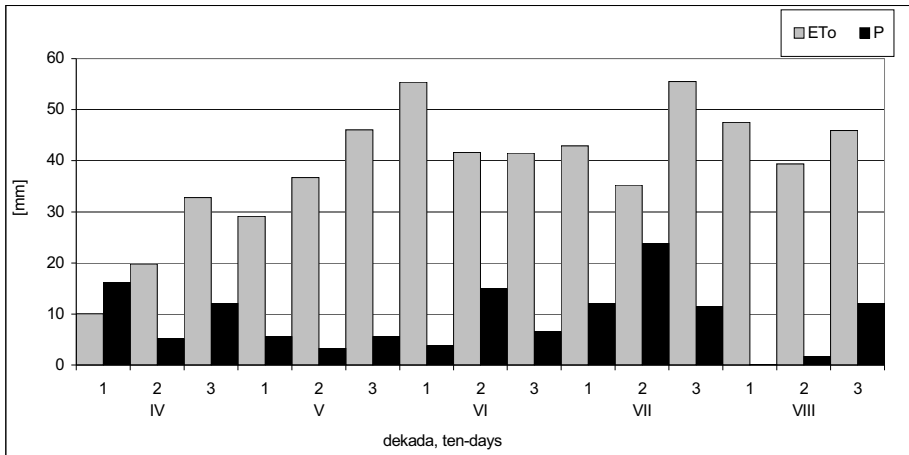
Opady w sezonie wegetacji 1960 r. były najwyższe z całego rozważanego wielolecia 1954–1995. Ich suma wyniosła 477 mm, z czego ponad 25% odnotowano w trzeciej dekadzie lipca oraz ponad 16% w drugiej dekadzie sierpnia (rys. 7). W siedmiu dekadach tego okresu opad był niższy od średniego opadu z wielolecia. Rozkład ewapotranspiracji wskaźnikowej był, w porównaniu z opadem, równomierny. Największe możliwości atmosfery do przyjmowania pary wodnej odnotowano w maju, a najniższe na początku okresu wegetacji. ET_0 przekroczyła wartości średnie w 11 dekadach, nawet o 56% w ostatniej dekadzie lipca. Ewapotranspiracja była niższa od przeciętnej w 4 dekadach (pierwszej i trzeciej dekadzie kwietnia oraz ostatniej dekadzie maja i pierwszej czerwca).

Z powodu dużych różnic sum opadów w poszczególnych dekadach – klimatyczny bilans wodny ma zróżnicowane wartości i waha się od –33 mm w pierwszej dekadzie maja (bezopadowej o wysokiej ewapotranspiracji 33 mm) do 95 mm w ostatniej dekadzie lipca (o najwyższej sumie opadów 121,3 mm) (rys. 7, 8).



Rys. 8. Sumy dekadowe klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1960, o najwyższej sumie opadów (477 mm) w Łodzi

Fig. 8. Ten-days climatic water balance sums in vegetation season of spring wheat in year 1960 with the biggest precipitation (477 mm) in Łódź

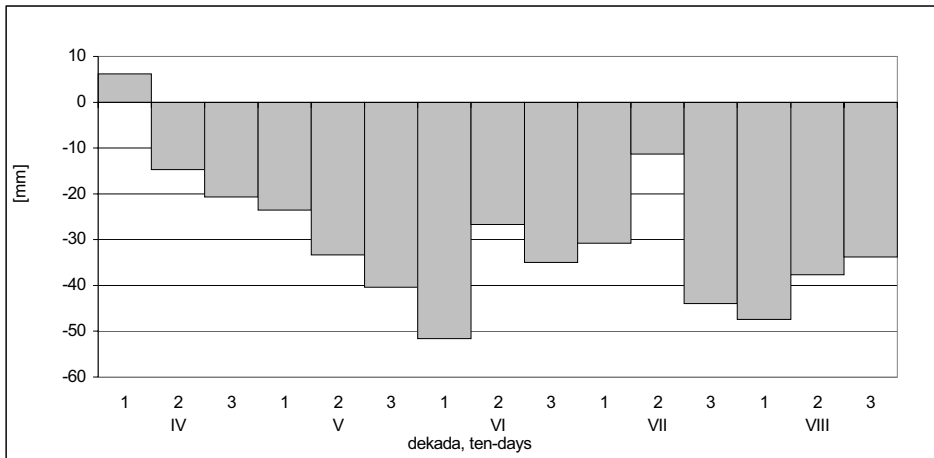


Rys. 9. Sumy dekadowe ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1992, o najniższej sumie opadów (135 mm) w Łodzi

Fig. 9. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1992 with the lowest precipitation (135 mm) in Łódź

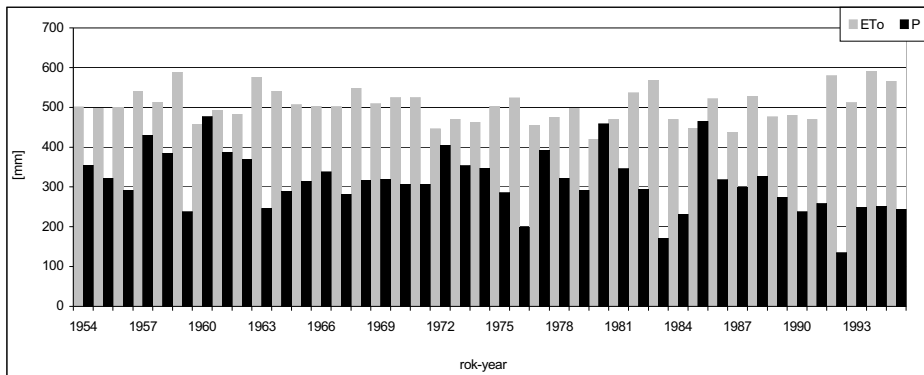
W 1992 roku suma opadów wyniosła 134,5 mm i była najniższa z całego badanego wielolecia. Jedynie w pierwszej dekadzie kwietnia (16,2 mm) suma opadów przekroczyła średnią sumę wieloletnią (13,4 mm) (rys. 9). Przy tak niskich opadach wysokie wartości niedosytu wilgotności powodują bardziej intensywne odbieranie wilgoci czego efektem są wartości ewapotranspiracji wahające się od 10 mm w dekadzie o dość wysokich opadach do 55 mm w pierwszej dekadzie czerwca (średnia z wielolecia w tej dekadzie wynosi 37 mm) i ostatniej dekadzie lipca (średnia wieloletnia 41 mm).

Konsekwencją wysokich wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej przy bardzo niskich opadach są ujemne wartości klimatycznego bilansu wodnego (rys. 10).



Rys. 10. Sumy dekadowe klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1992 o najniższej sumie opadów (135 mm) w Łodzi

Fig. 10. Ten-days climatic water balance sums in vegetation season of spring wheat in year 1992 with the lowest precipitation (135 mm) in Łódź



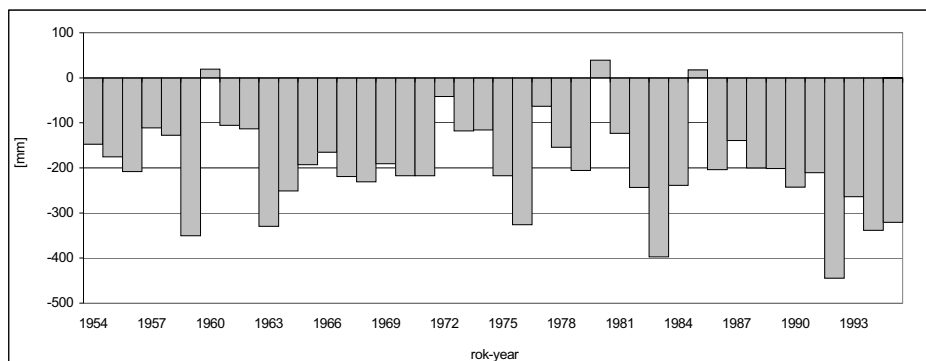
Rys. 11. Sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1954–1995 w Łodzi

Fig. 11. Reference evapotranspiration and precipitation sums in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1954–1995 in Łódź

Z wyjątkiem pierwszej dekady kwietnia okres wegetacji o najniższych opadach charakteryzuje się bardzo dużymi niedoborami wody, narastającymi w kolejnych dekadach.

Na podstawie wartości sum opadów i ewapotranspiracji z całego wielolecia (rys. 11) można zauważyć, że lata o niskich opadach, jak na przykład 1959, 1983, 1992, 1994, 1995, cechują się wysokimi wartościami ET_o , czyli w konsekwencji dużymi niedoborami wody, którym odpowiadają niskie wartości klimatycznego bilansu wodnego. Lata

o wysokich opadach, 1960, 1972, 1977, 1980, 1985 – charakteryzują się niskimi wartościami ewapotranspiracji, a zatem niewielkimi niedoborami wody a nawet w latach 1960, 1980, 1985 jej dostatkami (KBW równe odpowiednio 19,5, 38,9 oraz 17,4 mm) (rys. 12).



Rys. 12. Sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1954–1995 w Łodzi

Fig. 12. Climatic water balance sums in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1954–1995 in Łódź

5.3.3. Bydgoszcz

W Bydgoszczy badaniami objęte było najdłuższe, w porównaniu z innymi stacjami, wielolecie 1946–2004. Poniżej zostały przedstawione wyniki obliczeń podstawowych parametrów statystycznych i na ich podstawie scharakteryzowane warunki wodne dla poszczególnych dekad oraz miesięcy na przestrzeni całego wielolecia.

Ewapotranspiracja w Bydgoszczy, analogicznie jak w pozostałych stacjach, wykazuje podobną zmienność sezonową (tab. 16). Najniższe zdolności atmosfery do przyjęcia wilgoci zaobserwowano na początku okresu wegetacji (54,7 mm w kwietniu), następnie rosną one nieprzerwanie do przełomu maja i czerwca i utrzymują się na podobnym poziomie (od 32,5 do 36,2 mm) przez 8 kolejnych dekad. Na końcu okresu wegetacji (ostatnie dwie dekady sierpnia) ewapotranspiracja maleje. Analogiczna zmienność sezonowa występuje dla wartości maksymalnych i minimalnych. Dla większości okresów współczynnik skośności przyjmuje wartości dodatnie, co wskazuje na asymetrię prawostronną. Dla drugiej dekady kwietnia, pierwszej dekady sierpnia oraz miesiąca maja współczynnik skośności jest ujemny, co oznacza, że większość z 59 okresów charakteryzowała się wartościami ewapotranspiracji potencjalnej wyższymi od przeciętnych.

Tabela 16
Table 16

Podstawowe charakterystyki ewapotranspiracji wskaźnikowej (mm) w wieloleciu
1946–2004 w Bydgoszczy
Basic characteristics of reference evapotranspiration ET_0 (mm)
in Bydgoszcz 1946–2004

ET_0	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	15,3	22,3	9,2	3,0	0,38	14,6
2 IV	17,9	24,8	10,3	3,3	-0,14	17,4
3	21,5	34,0	14,5	4,5	0,69	21,5
m	54,7	73,6	40,6	7,4	0,18	54,4
1	25,1	38,2	15,5	5,1	0,55	23,9
2 V	27,8	39,5	18,6	5,2	0,15	28,3
3	33,7	48,9	22,5	6,1	0,46	32,7
m	86,6	109,3	59,9	11,2	-0,21	82,8
1	33,4	48,1	21,6	5,6	0,08	32,9
2 VI	32,6	45,0	23,0	5,2	0,22	32,7
3	32,5	50,1	22,6	6,6	0,53	31,8
m	98,5	123,5	70,6	11,6	0,03	98,8
1	35,5	49,8	21,8	6,8	0,13	35,2
2 VII	33,0	43,3	22,7	5,1	0,00	32,8
3	36,2	53,9	22,9	6,6	0,35	35,5
m	104,6	137,5	76,8	14,2	0,10	105,6
1	33,3	43,5	20,8	5,2	-0,03	33,9
2 VIII	29,0	39,0	19,5	4,7	0,26	28,3
3	27,7	37,1	19,6	4,4	0,14	27,8
m	90,0	113,2	70,6	9,7	0,35	89,5
IV–VIII	434,5	512,0	349,3	34,6	0,12	431,5

Średnie dekadowe sumy opadów, dla piętnastu dekad okresu IV–VIII odnotowane w Bydgoszczy w wieloleciu liczącym prawie 60 lat, wykazują wyraźną zmienność sezonową (tab. 17). Najniższe opady wystąpiły w kwietniu (9,8; 9,1; 11,3 mm), następnie zaobserwowano wzrost sum opadowych do lipca, z niewielkim załamaniem na przełomie maja i czerwca. Najwyższe średnie sumy opadów wystąpiły w lipcu (24,7; 29,9; 27,8 mm). Najwyższą dekadową sumę opadów (189,7 mm) odnotowano w drugiej dekadzie czerwca 1980 r., który cechował się najwyższą sumą opadów z całego okresu wegetacji pszenicy. Efektem wystąpienia tak wysokiej sumy dekadowej opadu jest najwyższe zróżnicowanie ze wszystkich dekad czerwca oraz bardzo silna asymetria prawostronna, wynikająca z różnicy pomiędzy wartością średnią a medianą wynoszącą 5,3 mm. Na podstawie dekadowych wartości minimalnych opadu można stwierdzić, że każda dekada przynajmniej raz w ciągu badanych 59 lat była bezopadowa.

Tabela 17
Table 17

Podstawowe charakterystyki opadów (mm) w wieloleciu 1946–2004 w Bydgoszczy
Basic characteristics of precipitation P (mm) in Bydgoszcz 1946-2004

P	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	9,8	46,1	0,0	9,1	1,78	8,0
2 IV	9,1	49,7	0,0	9,4	1,92	6,4
3	11,3	35,4	0,0	9,3	1,04	9,5
m	30,2	86,6	7,4	15,4	1,33	27,9
1	16,1	87,0	0,0	16,2	1,98	12,2
2 V	17,7	88,7	0,0	18,0	2,08	12,2
3	15,3	67,0	0,0	14,7	1,21	11,8
m	49,0	112,8	7,1	28,6	0,66	40,8
1	17,0	77,2	0,0	14,8	1,92	13,3
2 VI	20,7	189,7	0,0	25,8	5,00	15,4
3	20,3	112,0	0,0	21,0	1,81	13,3
m	58,0	316,5	17,8	43,8	3,84	46,8
1	24,7	129,2	0,0	24,6	2,13	18,7
2 VII	29,9	131,0	0,0	26,3	1,80	22,4
3	27,8	133,0	0,0	29,3	1,90	17,4
m	82,4	216,5	9,9	51,6	0,94	72,8
1	19,5	129,8	0,0	20,9	2,87	15,7
2 VIII	18,6	68,3	0,0	15,5	1,19	14,2
3	22,8	75,4	0,0	19,4	0,79	17,9
m	60,9	210,1	7,0	33,7	1,72	55,0
IV–VIII	280,7	599,1	99,1	84,2	0,99	262,1

Sezonowa zmienność wartości klimatycznego bilansu wodnego w Bydgoszczy wskazuje na zróżnicowane niedobory wody w kolejnych etapach rozwoju roślin w okresie wegetacji (tab. 18). Największe braki wody występują na przełomie maja i czerwca. Ewapotranspiracja rośnie przy niezmiennych się opadach od początku okresu wegetacji. W lipcu niedobory wody (KBW = -26,8 mm) rekompensowane są przez najwyższe opady (P = 82,4 mm), w sierpniu niedobory wody znów rosną. Zróżnicowanie klimatycznych bilansów wodnych jest największe w lipcu, co jest skutkiem nierównomierności opadów w tym okresie. Dla wszystkich dekad, miesięcy oraz dla całego okresu IV–VIII KBW wykazuje asymetrię prawostronną, co świadczy o występowaniu odstających wysokich wartości. Zaznacza się druga dekada czerwca z największą wartością maksymalną (162,6 mm) oraz bardzo wysokim współczynnikiem skośności (4,23). Jest to bezpośrednim skutkiem opadów z 1980 r. w tej dekadzie (189,7 mm).

Tabela 18
Table 18

Podstawowe charakterystyki klimatycznego bilansu wodnego (mm) w wieloleciu
1946–2004 w Bydgoszczy
Basic characteristics of climatic water balance KBW (mm) in Bydgoszcz 1946–2004

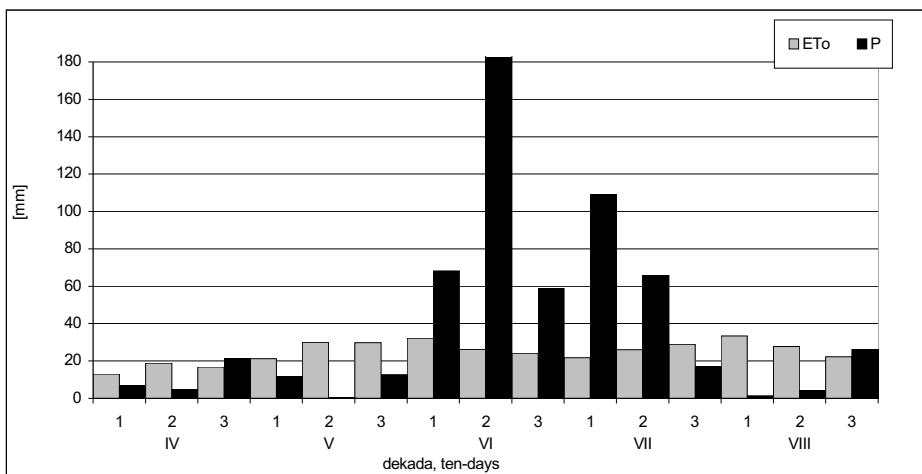
KBW	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	-6,7	32,5	-24,4	10,4	1,50	-7,7
2 IV	-9,9	33,7	-27,1	12,0	1,20	-12,7
3	-11,5	18,4	-35,9	12,3	0,49	-12,3
m	-28,1	40,4	-72,3	21,1	0,82	-30,8
1	-10,5	68,0	-42,1	19,8	1,34	-12,8
2 V	-11,6	65,5	-41,7	20,8	1,61	-14,2
3	-20,2	36,5	-51,8	18,1	0,62	-19,7
m	-42,3	50,5	-100,0	35,7	0,56	-47,6
1	-17,9	46,0	-43,9	17,6	1,28	-20,3
2 VI	-13,4	162,6	-47,6	28,4	4,23	-17,1
3	-13,7	86,2	-53,9	25,0	1,29	-18,6
m	-45,0	230,2	-106,1	50,6	2,98	-58,2
1	-12,4	99,1	-52,9	29,3	1,64	-16,3
2 VII	-4,5	104,0	-39,6	29,8	1,53	-12,2
3	-9,9	105,8	-50,8	34,1	1,64	-17,0
m	-26,8	126,5	-121,1	62,7	0,73	-32,6
1	-15,1	105,9	-45,7	24,0	2,38	-19,1
2 VIII	-11,5	39,9	-41,1	18,7	0,64	-14,7
3	-6,2	54,0	-38,8	22,1	0,51	-8,7
m	-32,9	130,3	-100,4	39,3	1,20	-38,1
IV–VIII	-153,8	226,8	-358,1	106,8	0,74	-161,6

➤ Charakterystyka lat o ekstremalnych sumach opadów w Bydgoszczy

Dla lat o maksymalnych (1980) i minimalnych (1989) opadach przeprowadzono szczegółową analizę zmienności wartości opadów, ewapotranspiracji wskaźnikowej oraz klimatycznego bilansu wodnego.

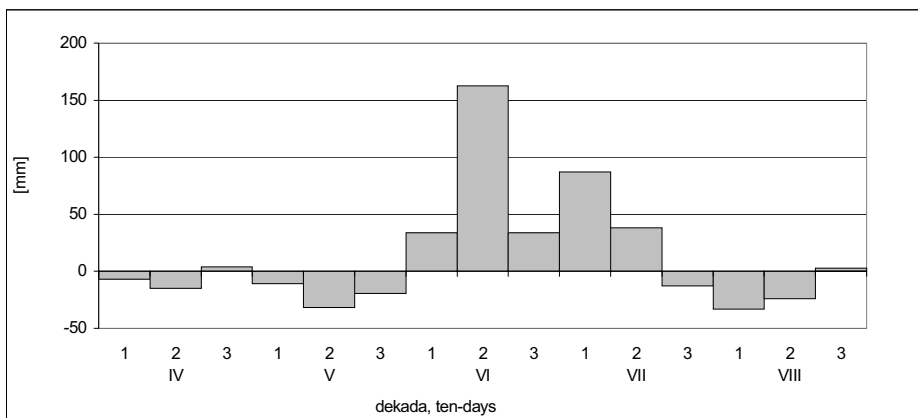
W roku 1980 o największej sumie opadów (599 mm) z okresu wegetacji pszenicy jarej w Bydgoszczy opad był rozłożony bardzo nierównomiernie (rys. 13). Najwyższe opady wystąpiły w czerwcu i pierwszych dwóch dekadach lipca, wynosząc odpowiednio w kolejnych dekadach 68,1; 189,7; 58,7; 109,3 oraz 65,8 mm. Tak duże opady spowodowały obniżenie ewapotranspiracji, która wyniosła: 32,2; 26,1; 24,1; 21,8; 26,1 mm. Wartości te są niższe od średnich wieloletnich o 3,6; 20; 25; 38,6 oraz 20,8%.

Wysokie opady spowodowały wzrost wartości klimatycznego bilansu wodnego. Na podstawie rysunku 14 widać, że tylko omawiane pięć dekad o bardzo wysokich opadach daje w konsekwencji dodatnie wartości KBW. W pozostałych dekadach ewapotranspiracja przekraczała opady lub była do nich zbliżona.



Rys. 13. Dekadowe sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1980, o najwyższej sumie opadów (599 mm) w Bydgoszczy

Fig. 13. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1980 with the biggest precipitation (599 mm) in Bydgoszcz



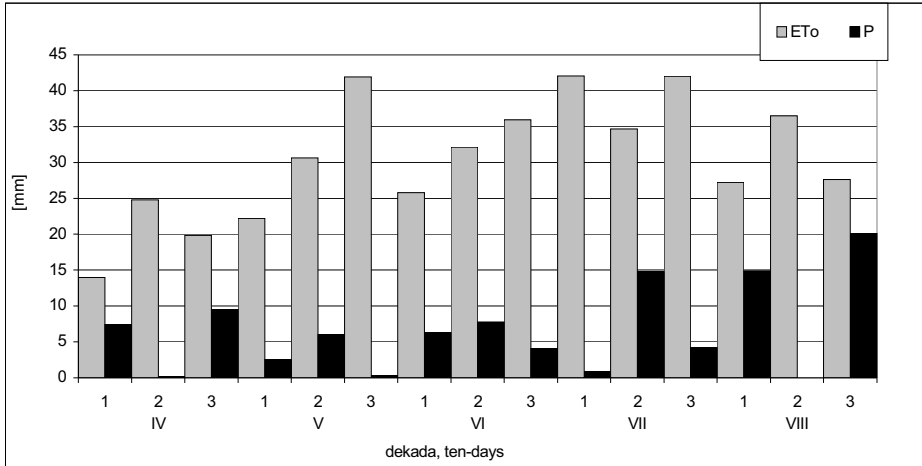
Rys. 14. Dekadowe sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1980 o najwyższej sumie opadów (599 mm) w Bydgoszczy

Fig. 14. Ten-days climatic water balance in vegetation season of spring wheat in year 1980 with the biggest precipitation (599 mm) in Bydgoszcz

Rok 1989 w Bydgoszczy charakteryzował się najniższą z całego wielolecia sumą opadów z okresu wegetacji pszenicy jarej. Opad ten we wszystkich piętnastu badanych dekadach był niższy od średniego dekadowego opadu z wielolecia. Z niskim opadem związane są podwyższone wartości ewapotranspiracji, wynikające ze wzrostu wartości niedosytu wilgotności. Dekady o najniższych opadach cechują najwyższe wartości ET_0 ,

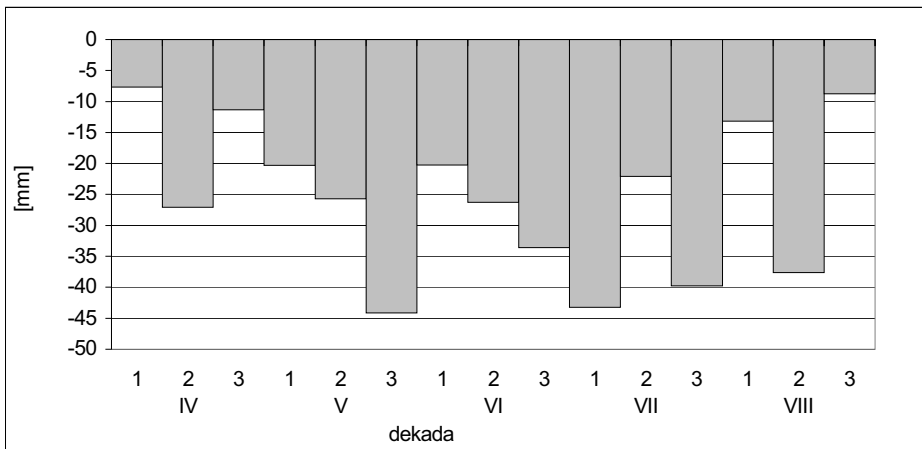
które wynoszą: 41,9 mm w ostatniej dekadzie maja, 42,1 mm w pierwszej dekadzie lipca oraz 42,0 mm w ostatniej dekadzie lipca (wyższe od przeciętnych odpowiednio o 24,3; 18,6 oraz 16,1%).

Wartości klimatycznego bilansu wodnego były ujemne oraz niższe od wartości przeciętnych we wszystkich dekadach okresu wegetacji 1989 r. w Bydgoszczy (rys. 16). W pierwszej dekadzie lipca niedobór wody był o ponad 230% większy niż przeciętny.



Rys. 15. Dekadowe sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1989 o najniższej sumie opadów (99 mm) w Bydgoszczy

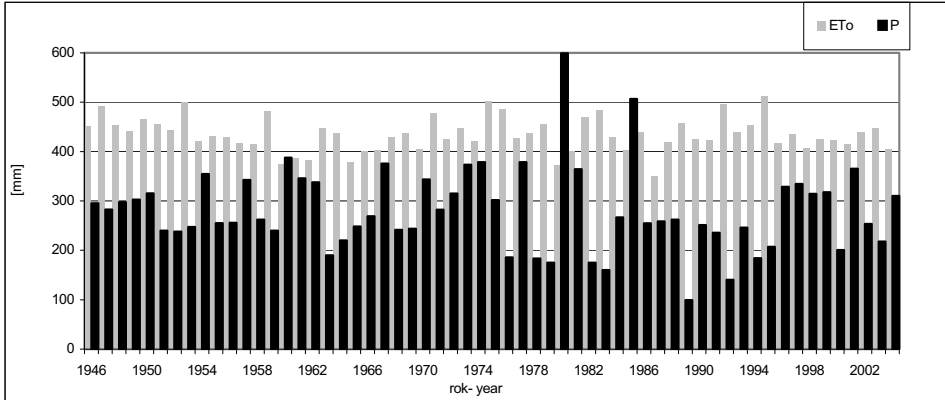
Fig. 15. Ten-days reference evapotranspiration ET₀ and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1989 with the lowest precipitation (99 mm) in Bydgoszcz



Rys. 16. Dekadowe sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1989 o najniższej sumie opadów (99 mm) w Bydgoszczy

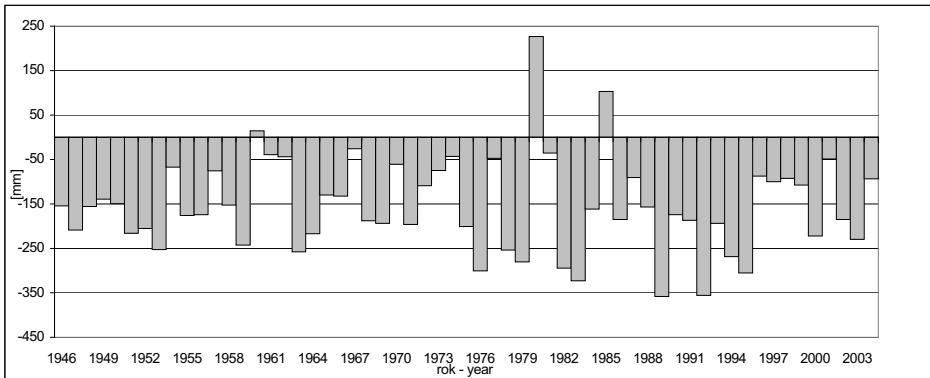
Fig. 16. Ten-days climatic water balance in vegetation season of spring wheat in year 1989 with the lowest precipitation (99 mm) in Bydgoszcz

Klimatyczny bilans wodny przyjmuje wartości dodatnie w trzech latach z wielolecia 1946–2004: 1960, 1980 i 1985 (rys. 18). Rok 1960 charakteryzuje się sumą opadów wynoszącą 387,9 mm i niemal najniższą ewapotranspiracją – 373,4 mm (rys.17). Rok 1980 został opisany jako „mokry”. W roku 1985 opad wyniósł 506,6 mm (co stanowi 180% średniego opadu), a ewapotranspiracja (403,2 mm) o 7% przekroczyła średnią.



Rys. 17. Sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresach wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1946–2004 w Bydgoszczy

Fig. 17. Reference evapotranspiration and precipitation sums in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1946–2004 in Bydgoszcz



Rys. 18. Sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresach wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1946–2004 w Bydgoszczy

Fig. 18. Climatic water balance in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1946–2003 in Bydgoszcz

5.3.4. Wrocław-Swojec

Dla Wrocławia, podobnie jak dla pozostałych stacji, wyznaczone zostały wartości średnie, maksymalne, minimalne, odchylenia standardowe, mediany i współczynniki skośności dla każdej dekady oraz miesiąca na przestrzeni całego wielolecia 1964–2000.

Tabela 19

Table 19

Podstawowe charakterystyki ewapotranspiracji wskaźnikowej (mm) w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu

Basic characteristics of reference evapotranspiration ET_0 (mm) in Wrocław 1964–2000

ET_0	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	20,3	31,6	12,2	4,5	0,26	19,7
2 IV	22,8	32,7	15,9	4,2	0,62	22,4
3	26,1	42,3	16,3	5,3	0,77	25,5
m	69,2	85,9	54,5	7,7	-0,14	70,3
1	30,2	43,0	19,6	6,0	0,49	29,1
2 V	32,1	45,4	18,8	6,6	-0,22	33,0
3	36,0	52,4	24,8	6,6	0,35	36,6
m	98,3	117,0	73,1	12,3	-0,39	101,9
1	36,4	50,6	24,4	6,3	0,23	35,3
2 VI	35,4	48,2	22,7	5,9	0,29	34,5
3	35,3	51,2	24,2	6,1	0,87	33,4
m	107,2	132,6	85,7	11,5	0,18	107,0
1	39,3	51,2	28,0	6,3	0,26	38,3
2 VII	37,1	52,2	26,2	6,4	0,57	36,2
3	42,1	62,2	29,6	8,8	0,60	40,5
m	118,5	160,4	89,1	16,7	0,67	114,2
1	38,8	55,5	28,3	6,9	0,70	37,6
2 VIII	35,1	45,3	23,2	6,0	-0,36	35,9
3	32,9	45,3	23,4	4,9	0,57	32,4
m	106,8	137,2	92,4	12,5	0,24	106,8
IV–VIII	500,0	605,3	420,8	40,7	0,22	504,5

Średnie wartości ewapotranspiracji wskazują, że możliwości atmosfery do przyjmowania wilgoci są największe w lipcu (tab. 19). W tym miesiącu wartości średnie oraz maksymalne zarówno dla dekad, jak i dla całego miesiąca są najwyższe. Większość okresów wykazuje asymetrię prawostronną, na co wskazują dodatnie wartości współczynnika skośności. Jedynie w drugiej dekadzie maja i sierpnia oraz w kwietniu i maju zaobserwowano asymetrię lewostronną, co oznacza, że co najmniej 17 okresów miało sumę ewapotranspiracji wyższą od średniej dla danego okresu (na przykład dla maja 21 miesięcy miało wartości ET_0 większe od średnich).

Tabela 20
Table 20

Podstawowe charakterystyki opadów (mm) w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu
Basic characteristics of precipitation P (mm) in Wrocław 1964–2000

P	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	12,0	50,6	0,0	10,3	1,64	10,0
2 IV	13,5	41,4	0,0	10,6	0,75	11,2
3	13,3	58,0	0,0	13,1	1,82	8,2
m	38,8	76,6	5,7	17,2	0,34	33,1
1	18,7	97,8	0,0	19,9	2,25	12,5
2 V	16,3	50,9	0,0	13,7	0,70	12,9
3	21,8	72,9	0,0	19,1	1,09	26,5
m	56,9	125,1	5,1	31,6	0,25	62,2
1	18,9	67,3	0,0	15,4	0,93	17,4
2 VI	28,6	109,9	1,0	21,9	1,62	22,8
3	25,3	81,7	0,0	17,8	1,02	23,6
m	72,8	135,9	17,6	29,3	0,49	69,5
1	31,4	160,6	0,0	31,2	2,25	21,8
2 VII	30,3	134,4	0,1	29,6	1,80	21,3
3	24,3	104,8	0,0	22,9	1,28	24,1
m	86,0	249,7	12,2	51,8	1,18	82,6
1	28,4	152,9	0,0	31,0	2,52	22,3
2 VIII	19,0	83,9	0,0	18,2	1,60	16,2
3	24,8	71,6	0,0	20,2	0,89	21,8
m	72,1	194,0	4,1	43,8	1,10	57,6
IV–VIII	326,3	493,8	161,0	79,5	0,22	313,7

We Wrocławiu, podobnie jak w pozostałych stacjach, lipiec był miesiącem o najwyższych średnich (85,7 mm) i maksymalnych (249,7 mm) sumach opadów (tab. 20). Maksymalny opad w drugiej dekadzie lipca oraz w miesiącu lipcu wystąpił w 1997 roku. Był to rok, w którym Wrocław nawiedziła powódź. Wśród 15 dekad okresu wegetacji pszenicy jarej jedynie drugie dekady czerwca i lipca nigdy nie były bezopadowe. Dla wszystkich okresów otrzymano dodatnie wartości współczynnika skośności świadczące o asymetrii prawostronnej.

Przesunięcie w czasie najwyższej ewapotranspiracji w stosunku do opadów powoduje, że niedobory wody wyrażone ilościowo klimatycznym bilansem wodnym są niskie na przełomie czerwca i lipca, a najwyższe w ostatniej dekadzie lipca, kiedy opad maleje, a ewapotranspiracja osiąga wartość największą (tab. 21). Odchylenie standardowe klimatycznego bilansu wodnego jest zdecydowanie największe ze wszystkich elementów tego bilansu i osiąga największą wartość w lipcu i sierpniu. Dekadowe oraz miesięczne wartości KBW wykazują we Wrocławiu asymetrię prawostronną, mimo to

sumy z całego okresu wegetacji pszenicy jarej IV–VIII wyznaczone dla 37 lat wielolecia 1964–2000 wykazują nieznaczną asymetrię lewostronną (18 okresów miało wyższą wartość KBW niż średnia wynosząca -173,7 mm).

Tabela 21

Table 21

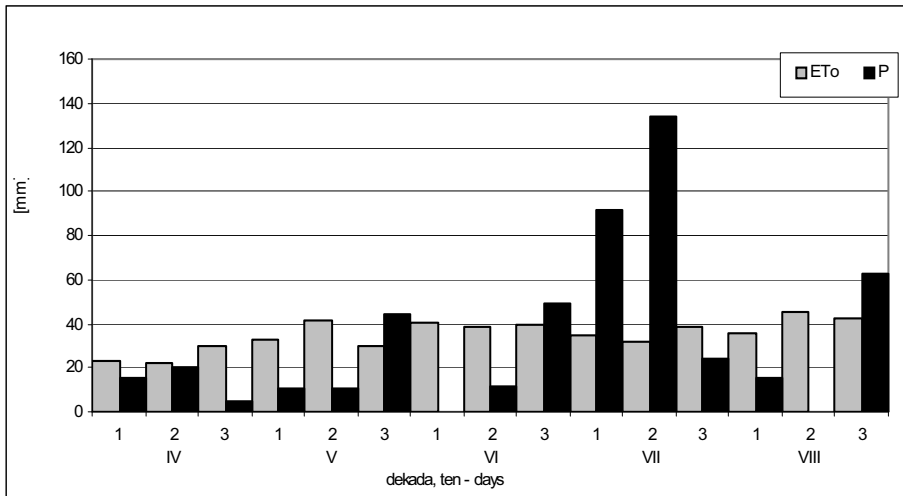
Podstawowe charakterystyki klimatycznego bilansu wodnego (mm) w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu

Basic characteristics of climatic water balance KBW (mm) in Wrocław 1964–2000

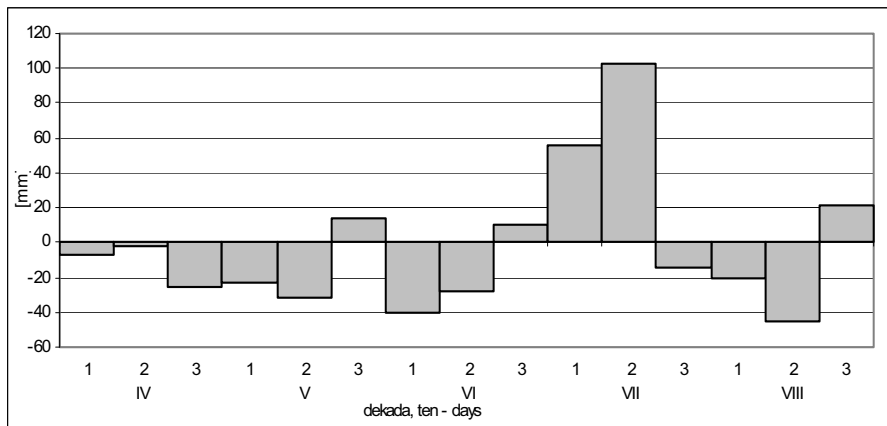
KBW	średnia mean	max.	min.	odchylenie standardowe standard deviation	skośność skewness	mediana median
1	-8,3	36,1	-31,6	13,0	1,08	-8,1
2 IV	-9,3	24,8	-30,3	12,8	0,55	-10,2
3	-12,8	41,7	-42,3	16,3	1,36	-17,0
m	-30,4	21,5	-68,9	20,9	0,22	-32,36
1	-11,4	77,1	-42,3	23,3	1,85	-16,1
2 V	-15,8	23,2	-45,4	18,4	0,39	-20,1
3	-14,2	38,7	-49,0	23,5	0,84	-19,4
m	-41,5	52,0	-110,7	41,0	0,30	-39,5
1	-17,5	40,9	-47,3	19,7	0,64	-16,6
2 VI	-6,8	83,1	-42,6	24,8	1,35	-12,1
3	-10,1	51,4	-47,8	21,3	0,62	-10,4
m	-34,4	36,9	-109,1	36,5	0,09	-36,0
1	-7,9	132,7	-50,2	34,9	1,95	-15,1
2 VII	-7,1	102,3	-51,5	33,2	1,44	-13,6
3	-17,7	75,0	-62,2	28,1	0,74	-10,9
m	-32,8	144,4	-148,2	63,1	0,74	-30,0
1	-10,4	122,9	-55,5	34,4	2,21	-20,3
2 VIII	-16,1	58,4	-45,3	22,0	1,29	-20,7
3	-8,1	37,5	-41,6	22,1	0,67	-10,6
m	-34,7	92,7	-115,6	51,5	1,05	-44,6
IV–VIII	-173,7	11,3	-444,3	107,7	-0,09	-182,5

➤ Charakterystyka lat o ekstremalnych sumach opadów we Wrocławiu

Jako pierwszy scharakteryzowany został okres wegetacji pszenicy o najwyższej sumie opadów, występujący w 1997 r., w którym to roku Wrocław dotknęła klęska powodzi spowodowana głównie bardzo wysokimi opadami. Opady w okresie wegetacji tego roku były rozłożone bardzo nierównomiernie, przez 8 dekad były one niższe od przeciętnych (rys. 19). Obfite opady w ostatniej dekadzie czerwca oraz pierwszych dwóch dekadach lipca spowodowały spadek ewapotranspiracji poniżej przeciętnej. Niemal bezopadowe dekady (pierwsza czerwca i druga sierpnia) są natomiast związane ze wzrostem ewapotranspiracji, która wyniosła odpowiednio 110 oraz 129% wartości przeciętnej.



Rys. 19. Dekadowe sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1997 o najwyższej sumie opadów (494 mm) we Wrocławiu
 Fig. 19. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1997 with the biggest precipitation (494 mm) in Wrocław

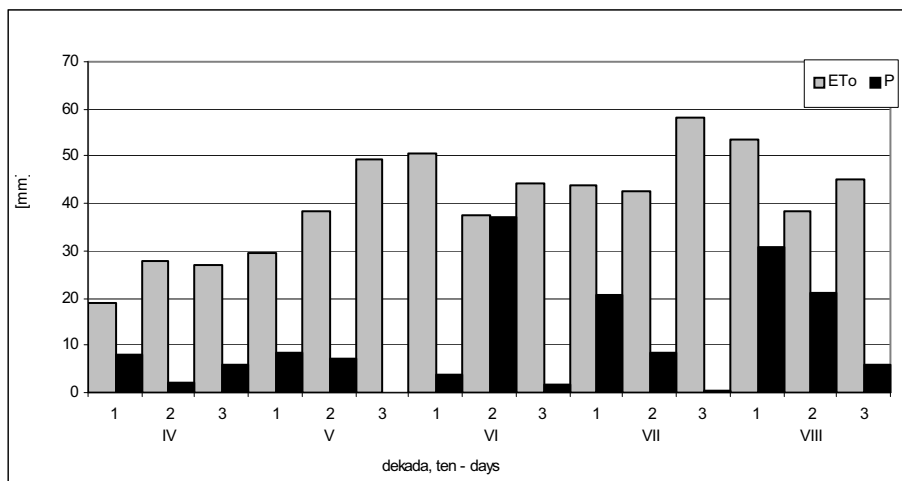


Rys. 20. Dekadowe sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1997 o najwyższej sumie opadów (494 mm) we Wrocławiu
 Fig. 20. Ten-days climatic water balance sums in vegetation season of spring wheat in year 1997 with the biggest precipitation (494 mm) in Wrocław

W przebiegu wartości klimatycznego bilansu wodnego (rys.20) w okresie wegetacji 1997 r. wyraźnie zaznacza się okres bardzo wysokich opadów, kiedy to KBW przyjmuje wysokie wartości dodatnie. Wyróżniają się również dekady bezopadowe, które charakteryzują niskie wartości klimatycznego bilansu wodnego.

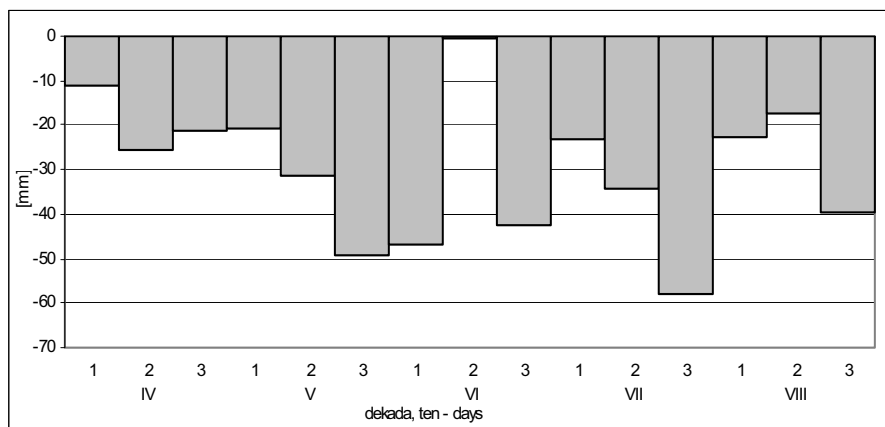
Przy niskich opadach w okresie wegetacji 1992 r. ewapotranspiracja była wyższa od przeciętnej w 13 dekadach (od 3% w trzeciej dekadzie kwietnia do 71% w ostatniej

dekadzie sierpnia) (rys. 21). Tylko w pierwszej dekadzie kwietnia i pierwszej dekadzie maja ewapotranspiracja była niewiele niższa od przeciętnej. Opad w okresie wegetacji 1992 r. wyniósł 161 mm, przy czym wyróżnić można cztery dekady o opadach przekraczających 10 mm, są to: druga dekada czerwca (36,9 mm), pierwsza dekada lipca (20,7 mm) oraz dwie początkowe dekady sierpnia (30,9 i 21 mm). Dekady te cechuje wyraźny spadek wartości ET_0 związany ze wzrostem wilgotności powietrza (spadkiem niedożytku wilgotności powietrza).



Rys. 21. Dekadowe sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1992 o najniższej sumie opadów (161 mm) we Wrocławiu

Fig. 21. Ten-days reference evapotranspiration ET_0 and precipitation P sums in vegetation season of spring wheat in year 1992 with the lowest precipitation (161 mm) in Wrocław

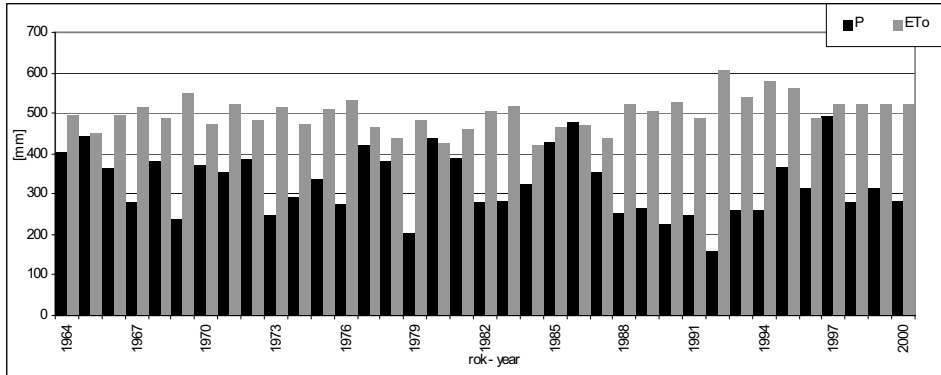


Rys. 22. Dekadowe sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 1992 o najniższej sumie opadów (161 mm) we Wrocławiu

Fig. 22. Ten-days climatic water balance sums in vegetation season of spring wheat in year 1992 with the lowest precipitation (161 mm) in Wrocław

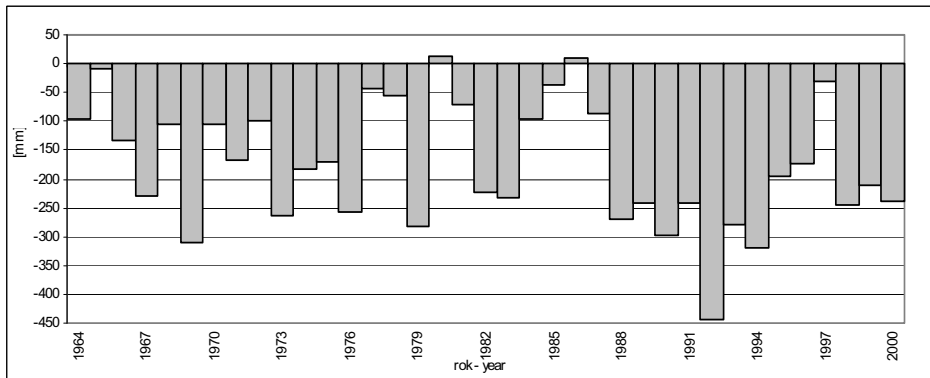
W roku o najniższych opadach klimatyczny bilans wodny był ujemny przez cały okres wegetacji (rys. 22).

W wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu sumy opadów z okresu wegetacji zmieniały się od 161 mm w 1992 r. do 494 mm w 1997 roku. Ewapotranspiracja przyjęła najmniejszą wartość 421 mm w 1984 r. (opad 325,5 mm), a największą wynoszącą 605 mm – w 1992 roku o minimalnym opadzie (rys. 23).



Rys. 23. Sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresach wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu

Fig. 23. Reference evapotranspiration and precipitation sums in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1964–2000 in Łódź



Rys. 24. Sumy klimatycznego bilansu wodnego w okresach wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu

Fig. 24. Climatic water balance sums in vegetation period of spring wheat (IV–VIII) in years 1964–2000 in Wrocław

W dwóch okresach wegetacji: 1980 oraz 1986 klimatyczny bilans wodny był dodatni (rys. 24). Były to lata o dużych opadach wynoszących odpowiednio w okresie wegetacyjnym 438,0 i 480,3 mm.

5.4. Bilans cieplny pszenicy jarej w okresie wegetacji (IV–VIII)

Na podstawie modelu MBC opisanego w rozdziale 4.1 wyznaczono wartości liczbowe składowych bilansu cieplnego powierzchni czynnej pokrytej pszenicą jarą. Wyznaczono również wartości stosunków między nimi dla czterech badanych rejonów.

Przyjęto następujące określenia: rok o maksymalnych opadach w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w badanym wieloleciu będzie dalej nazywany „mokrym”, a rok o minimalnych opadach – „suchym”.

5.4.1. Gorzów Wielkopolski – wielolecie 1970–1995

Bilans cieplny pszenicy jarej w Gorzowie Wielkopolskim został wyznaczony dla całego wielolecia, czyli 26 okresów wegetacji trwających od początku kwietnia do końca sierpnia. Na podstawie wyznaczonych dekadowych wartości składowych tego bilansu wyznaczone zostały średnie wartości w okresie wegetacji poszczególnych strumieni wchodzących w skład bilansu cieplnego oraz ich ilorazy. Wyniki przedstawia tabela 22.

W wieloleciu 1970–1995 w Gorzowie Wlkp. promieniowanie netto R_n (średnie z okresu wegetacji pszenicy jarej IV–VIII) wahało się od $93 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1974 r. do $112 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1982 roku.

Okresy o średnim promieniowaniu netto przekraczającym $110 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (1975 r., 1982 r.) charakteryzują się jednocześnie małymi sumami opadów (233,0 i 153,6 mm odpowiednio) lub wysoką średnią temperaturą wynoszącą w 1975 roku $15,1^\circ\text{C}$. Małe wartości promieniowania netto, nie przekraczające $95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, odnotowano w latach o opadach przekraczających 330 mm (przy średniej wieloletniej wynoszącej 266,3 mm).

Energia zużyta na parowanie jest największą składową rozchodową bilansu cieplnego i wahała się od $59 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w roku 1988 (co odpowiada odparowaniu 20,8 mm słupa wody średnio w dekadzie) o małym promieniowaniu netto ($96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) do $72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (25,4 mm słupa wody w dekadzie) w roku 1976 o dużym promieniowaniu netto ($110 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Gęstość strumienia ciepła utajonego przekracza $70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w latach o opadach mniejszych od przeciętnych.

Gęstość strumienia ciepła jawnego H zmieniała się od $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1977 r. (o dużych opadach wynoszących 460 mm) do $33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1982 r. (o największym saldzie promieniowania R_n i minimalnym opadzie 153,6 mm).

Gęstość strumienia ciepła glebowego G jest najmniejszą składową rozchodową bilansu cieplnego. Średnie wartości tego strumienia zmieniają się od 7 do $9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, co stanowi 7–8% salda promieniowania.

Bilans cieplny w Gorzowie Wlkp. ma przez całe wielolecie charakter konwekcyjny. Średnie wartości stosunku ciepła jawnego do ciepła utajonego (współczynnik Bowena) wahały się od 0,39 w 1977 r. (o maksymalnym opadzie) do 0,52 w 1971 r. (o opadach zbliżonych do przeciętnych 256,4 mm).

Tabela 22

Table 22

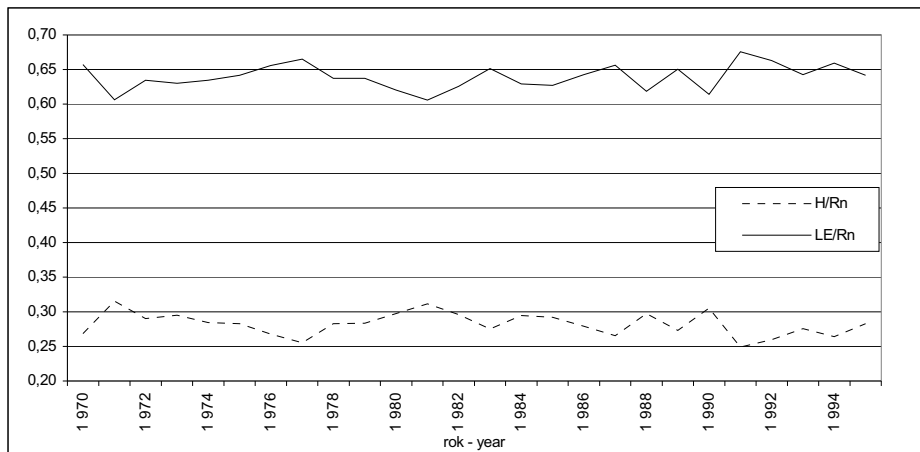
Średnie wartości składowych bilansu cieplnego pszenicy jarej (IV–VIII) w Gorzowie Wielkopolskim
 Components of heat balance during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in Gorzów
 Wielkopolski

Rok Year	R _n	LE	G	H	LE(mm/ dekada)	-LE/R _n	-H/R _n	-G/R _n	H/LE	T	P
1970	101	-66	-8	-27	23,4	0,65	0,27	0,08	0,41	14,2	215,3
1971	105	-64	-8	-33	22,4	0,61	0,31	0,08	0,52	15,2	256,4
1972	98	-62	-7	-29	21,9	0,63	0,30	0,07	0,47	14,5	306,2
1973	105	-66	-8	-31	23,4	0,63	0,30	0,07	0,47	14,3	273,7
1974	93	-59	-7	-27	20,9	0,63	0,29	0,08	0,46	13,6	330,6
1975	111	-71	-9	-31	25,1	0,64	0,28	0,08	0,44	15,1	233,0
1976	110	-72	-8	-30	25,4	0,66	0,27	0,07	0,42	14,3	172,7
1977	97	-64	-8	-25	22,8	0,66	0,26	0,08	0,39	13,6	460,0
1978	101	-64	-8	-29	22,6	0,63	0,29	0,08	0,45	13,5	279,0
1979	103	-66	-8	-29	23,1	0,64	0,28	0,08	0,44	14,3	225,5
1980	95	-59	-8	-28	20,9	0,62	0,30	0,08	0,47	12,9	320,1
1981	104	-63	-8	-32	22,1	0,61	0,31	0,08	0,51	14,5	306,9
1982	112	-70	-9	-33	24,8	0,63	0,29	0,08	0,47	15,1	153,6
1983	109	-71	-8	-30	24,9	0,65	0,28	0,07	0,42	15,8	214,4
1984	95	-60	-7	-28	21,0	0,63	0,30	0,07	0,47	13,6	353,1
1985	103	-65	-8	-30	22,8	0,63	0,29	0,08	0,46	14,5	229,6
1986	106	-68	-8	-30	23,9	0,64	0,28	0,08	0,44	14,6	255,2
1987	94	-62	-7	-25	21,8	0,66	0,27	0,07	0,40	13,4	365,3
1988	96	-59	-8	-29	20,8	0,62	0,30	0,08	0,49	15,0	259,7
1989	108	-70	-8	-30	24,8	0,65	0,28	0,07	0,43	15,1	190,9
1990	108	-66	-9	-33	23,3	0,61	0,31	0,08	0,50	15,0	285,4
1991	102	-69	-8	-25	24,2	0,67	0,25	0,08	0,36	14,1	221,0
1992	109	-72	-9	-28	25,3	0,66	0,26	0,08	0,39	16,6	170,0
1993	100	-64	-8	-28	22,6	0,64	0,28	0,08	0,44	15,0	268,0
1994	108	-71	-8	-29	25,0	0,66	0,27	0,07	0,41	15,7	259,0
1995	108	-69	-8	-31	24,4	0,64	0,29	0,07	0,45	15,3	320,0

Oznaczenia: R_n – promieniowanie netto (W·m⁻²), LE – strumień ciepła utajonego (W·m⁻²), G – strumień ciepła glebowego (W·m⁻²), H – strumień ciepła jawnego (W·m⁻²), P – suma opadów z okresu IV–VIII (mm), T – średnia temperatura z okresu IV–VIII (°C)

Sings: R_n – net radiation (W·m⁻²), LE – latent heat flux (W·m⁻²), G – soil heat flux (W·m⁻²), H – sensible heat flux (W·m⁻²), P – sum of precipitation in period IV–VIII (mm), T – mean of temperature in period IV–VIII (°C)

Na rysunku 25 widoczne są zmiany średnich udziałów strumienia ciepła jawnego i utajonego w saldzie promieniowania.



Rys. 25. Średnie wartości ilorazów $-H/R_n$ oraz $-LE/R_n$ w wieloletniu 1970–1995 w Gorzowie Wielkopolskim

Fig. 25. Variation of mean ratio values of $-H/R_n$ and $-LE/R_n$ in years 1970–1995 in Gorzów Wielkopolski

Średnie udziały ciepła glebowego w saldzie promieniowania są w 17 latach spośród całego wielolecia równe 0,08, natomiast w 9 latach wynoszą 0,07. W związku z tym wykresy ilorazów H/R_n oraz LE/R_n są niemal symetryczne względem prostej $y=0,46$. Oznacza to, że każda zmiana wartości jednego z ilorazów pociąga za sobą niemal taką samą zmianę wartości drugiego ilorazu. Na rysunku 25 zaznacza się rok 1977 (o najwyższych opadach z wielolecia), w którym średnie udziały strumienia ciepła utajonego w saldzie promieniowania wyniosły 66%. Większy udział procentowy LE w R_n odnotowano tylko w roku 1991 (67%), który cechował się przeciętnymi opadami (221 mm) oraz dość niską temperaturą ($14,1^{\circ}\text{C}$).

5.4.2. Gorzów Wielkopolski – lata o ekstremalnych opadach

Lata o ekstremalnych warunkach opadowych zostały poddane dokładniejszej analizie poniżej (tab. 23).

Rok „mokry” w Gorzowie Wlkp. to rok 1977 o sumie opadów w okresie wegetacji wynoszącej 460 mm, co stanowi 173% opadu przeciętnego. W wartościach salda promieniowania wyraźnie zaznacza się maksimum w ostatniej dekadzie maja ($139 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Najmniejsza wartość R_n występuje na początku okresu wegetacji i wynosi $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Strumień ciepła utajonego ma od $34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w pierwszej dekadzie kwietnia do $97 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w pierwszej i drugiej dekadzie lipca. Zatem najwyższe parowanie wystąpiło cztery dekady później niż maksimum promieniowania netto. Na ogrzewanie atmosfery najmniej energii zostało zużyte na początku okresu wegetacji, następnie wystąpił wzrost gęstości strumienia ciepła jawnego do $31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w ostatniej dekadzie maja, po czym zaobserwowano ponowny spadek do $16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w drugiej dekadzie lipca (kiedy opad wyniósł

9,1 mm przy średniej z tej dekady wynoszącej 26,2 mm). W pierwszej dekadzie sierpnia ilość energii przeznaczona na ogrzewanie atmosfery wzrosła do $46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Strumień ciepła glebowego pochłaniał od 0 do $18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w ostatniej dekadzie maja. Współczynnik Bowena był najniższy (0,16) w drugiej dekadzie lipca. W pierwszej dekadzie maja (o opadzie 2,7 mm) współczynnik Bowena wzrósł do 0,63 przy wartościach 0,46 oraz 0,48 odpowiednio w poprzedniej i następnej dekadzie. W pierwszej i trzeciej dekadzie sierpnia na ogrzewanie atmosfery zużywane było więcej energii niż na parowanie, w wyniku czego współczynnik Bowena przyjął wartości większe od 1 (odpowiednio 1,02 oraz 1,05).

Tabela 23
Table 23

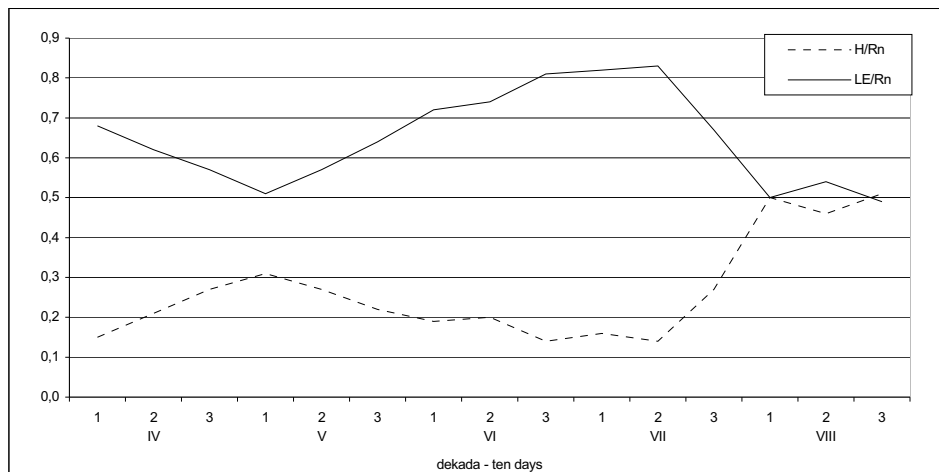
Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najwyższych opadach (1977) na stacji Gorzów Wielkopolski
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the biggest precipitation (1977) in Gorzów Wielkopolski

Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	T	P	P ₀	
IV	1	50	-34	-9	-7	12,1	0,68	0,14	0,18	0,21	3,5	23,7	14,5
	2	74	-46	-12	-16	16,2	0,62	0,22	0,16	0,35	3,9	8,7	11,8
	3	68	-39	-11	-18	13,7	0,57	0,26	0,16	0,46	9,1	47,9	13,0
V	1	85	-43	-15	-27	15,3	0,51	0,32	0,18	0,63	14,3	2,7	11,7
	2	95	-54	-15	-26	19,1	0,57	0,27	0,16	0,48	11,7	72,3	16,1
	3	139	-90	-18	-31	31,5	0,65	0,22	0,13	0,34	11,0	5,8	19,3
VI	1	124	-90	-10	-24	31,7	0,73	0,19	0,08	0,27	14,4	6,3	24,8
	2	123	-91	-7	-25	32,1	0,74	0,20	0,06	0,27	19,9	40,7	24,4
	3	118	-96	-5	-17	33,8	0,81	0,14	0,04	0,18	17,5	4,9	19,7
VII	1	119	-97	-3	-19	34,3	0,82	0,16	0,03	0,20	16,7	34,6	16,2
	2	116	-97	-3	-16	34,1	0,84	0,14	0,03	0,16	16,1	9,1	26,2
	3	99	-67	-6	-26	23,4	0,68	0,26	0,06	0,39	16,3	53,4	18,3
VIII	1	91	-45	0	-46	16,1	0,49	0,51	0,00	1,02	17,9	116,6	20,8
	2	76	-41	0	-35	14,5	0,54	0,46	0,00	0,85	15,3	25,7	15,0
	3	78	-38	0	-40	13,5	0,49	0,51	0,00	1,05	16,3	7,6	14,5
Suma – Sum											460,0	266,3	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1977 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 20

Signs: P – precipitation in 1977 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab.20

Przedstawione na poniższym rysunku udziały strumieni rozchodowych w saldzie promieniowania pozwalają na dokładniejsze badanie struktury bilansu ciepłego w roku „mokrym”.



Rys. 26. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/R_n$ oraz ciepła utajonego $-LE/R_n$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o największych opadach (1977) w Gorzowie Wlkp.

Fig. 26. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/R_n$ and latent heat flux and net radiation $-LE/R_n$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the biggest precipitation (1977) in Gorzów Wielkopolski

W pierwszych czterech dekadach okresu wegetacji udziały strumienia ciepła utajonego w promieniowaniu netto malały od 0,68 do 0,51. W tym czasie udziały strumienia ciepła jawnego wzrosły od 0,15 do 0,31. Od pierwszej dekady maja do drugiej dekady lipca coraz większa część energii była przeznaczana na parowanie (od 0,51 do 0,84). W ciągu miesiąca (trzy dekady) parowanie pochłaniało ponad 80% całej energii docierającej do powierzchni czynnej. W sierpniu kiedy gleba ani nie oddaje ciepła, ani nie pobiera ($G=0$) rozdział energii między H i LE jest niemal równy, jednak ciepło jawne w żadnej dekadzie nie zużywa większej części energii niż ciepło utajone.

Najniższa suma opadów z okresu IV–VIII wystąpiła w Gorzowie Wielkopolskim w 1982 r. i wyniosła 153 mm, co stanowi 57,4% średniego opadu z wielolecia dla tej stacji. W tabeli 24 przedstawione zostały wartości elementów bilansu ciepłego oraz ich ilorazów w kolejnych dekadach okresu wegetacji roku „suchego”.

Dekadowe sumy salda promieniowania rosły na początku okresu wegetacji od 60 do 156 $W \cdot m^{-2}$ w pierwszej dekadzie czerwca. W następnych dekadach w związku z opadem wynoszącym 12,7, 45,1 oraz 25,3 mm wartości R_n spadły do 109 $W \cdot m^{-2}$. Następnie przy minimalnych opadach (0,7, 0 mm) w drugiej i trzeciej dekadzie lipca znów wzrosły do 148 $W \cdot m^{-2}$. W sierpniu wartości promieniowania netto spadły do 84 $W \cdot m^{-2}$. W roku o najniższych opadach ilość energii dostarczanej do powierzchni czynnej była średnio w dekadzie o 15,4 $W \cdot m^{-2}$ wyższa niż w roku o najwyższej sumie opadów.

Tabela 24
Table 24

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najniższych opadach (1982) na stacji
Gorzów Wielkopolski
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the lowest
precipitation (1982) in Gorzów Wielkopolski

Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P	P ₀	
IV	1	60	-30	-10	-20	10,5	0,50	0,33	0,17	0,67	8,3	4,9	14,5
	2	73	-42	-12	-19	14,9	0,58	0,26	0,16	0,45	5,2	4,3	11,8
	3	88	-50	-14	-24	17,5	0,57	0,27	0,16	0,48	6,2	5,2	13,0
V	1	101	-52	-18	-31	18,3	0,51	0,31	0,18	0,60	9,4	25,2	11,7
	2	126	-65	-20	-41	22,9	0,52	0,33	0,16	0,63	14,3	0,8	16,1
	3	124	-74	-17	-33	26,2	0,60	0,27	0,14	0,45	15,8	6,8	19,3
VI	1	156	-115	-13	-28	40,5	0,74	0,18	0,08	0,24	20,2	2,0	24,8
	2	118	-95	-7	-16	33,3	0,81	0,14	0,06	0,17	13,7	12,7	24,4
	3	109	-82	-5	-22	28,8	0,75	0,20	0,05	0,27	15,9	45,1	19,7
VII	1	130	-105	-3	-22	36,9	0,81	0,17	0,02	0,21	16,7	25,3	16,2
	2	148	-117	-4	-27	41,0	0,79	0,18	0,03	0,23	21,7	0,7	26,2
	3	146	-96	-9	-41	33,8	0,66	0,28	0,06	0,43	20,3	0,0	18,3
VIII	1	129	-51	0	-78	18,0	0,40	0,60	0,00	1,53	23,0	1,8	20,8
	2	94	-43	0	-51	15,1	0,46	0,54	0,00	1,19	18,5	13,9	15,0
	3	84	-39	0	-45	13,8	0,46	0,54	0,00	1,15	16,6	4,9	14,5
Suma – Sum											153,0	266,3	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1982 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 20

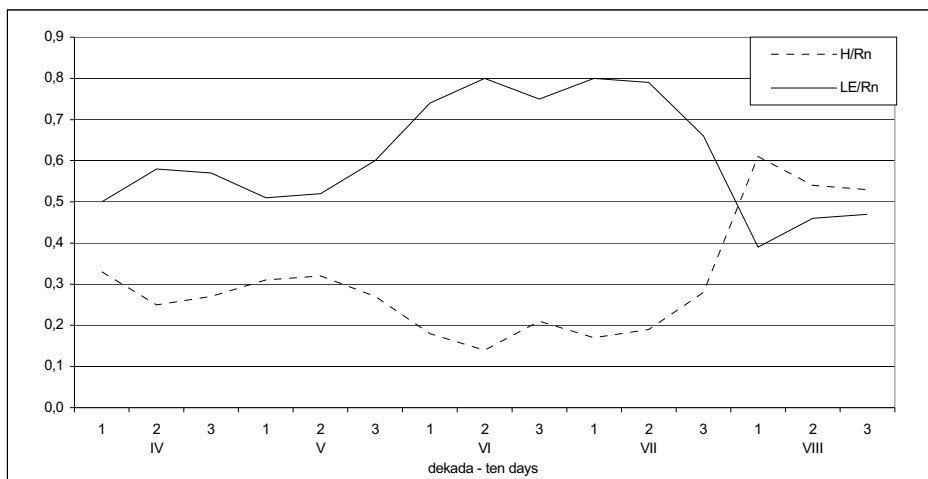
Signs: P – precipitation in 1982 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab. 20

Podobny przebieg podczas 15 dekad okresu wegetacji 1982 r. wykazują wartości strumienia ciepła utajonego, które zmieniały się od 30 do 115 W·m⁻² w pierwszej dekadzie czerwca i 117 W·m⁻² w drugiej dekadzie lipca.

Zdecydowanie większe wahania wykazują wartości strumienia ciepła jawnego. Jedno maksimum zauważalne jest w drugiej dekadzie maja (41 W·m⁻²), a drugie w pierwszej dekadzie sierpnia (78 W·m⁻²). Wartości gęstości strumienia ciepła glebowego rosną od 10 W·m⁻² na początku okresu do 20 W·m⁻² w drugiej dekadzie maja, następnie spadają do 0 W·m⁻², przyjmując tę wartość przez cały sierpień. W roku „suchym” współczynnik

Bowena na początku sierpnia sięga wartości 1,53, co oznacza, że na ogrzewanie atmosfery zużyte zostało o 53% więcej energii niż na parowanie.

Gęstości strumieni rozchodowych bilansu cieplnego zależą wprost od ilości energii dostarczonej do powierzchni czynnej. Bardziej obiektywne do oceny struktury bilansu cieplnego wydają się być udziały poszczególnych strumieni w promieniowaniu netto. Rysunek 27 przedstawia przebieg udziałów głównych składowych rozchodowych w saldzie promieniowania w roku „suchym”.



Rys. 27. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/R_n$ oraz ciepła utajonego $-LE/R_n$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o najniższych opadach (1982) w Gorzowie Wlkp.

Fig. 27. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/R_n$ and latent heat flux and net radiation $-LE/R_n$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the lowest precipitation (1982) in Gorzów Wielkopolski

Wykresy ilorazów LE/R_n oraz H/R_n wydają się być symetryczne względem pewnej poziomej prostej. Jest to spowodowane niewielką zmiennością trzeciego składnika rozchodowego, jakim jest ciepło glebowe (od 0 do 18%). Największą część energii pochłania ewapotranspiracja, która osiąga swoje maksimum w czerwcu i lipcu, kiedy pszenica transpiruje najsilniej [Rojek 1999]. W sierpniu ciepło jawne zaczyna górować nad ciepłem utajonym, co oznacza, że większa część energii jest wtedy przeznaczana na ogrzewanie atmosfery.

5.4.3. Łódź – wielolecie 1954–1995

Średnie roczne wartości składowych bilansu cieplnego i ich ilorazów dla wielolecia 1954–1995 w Łodzi przedstawia tabela 25.

W wieloleciu 1954–1995 w Łodzi najniższą średnią wartość promieniowania netto wynoszącą $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ odnotowano w 1960 roku. W roku tym zarejestrowano także najniższą sumę usłonecznienia liczącą 733,5 h przy średniej z wielolecia wynoszącej 1027,5 h oraz najwyższej sumy opadów w okresie wegetacji, a mianowicie 476,7 mm.

W związku z niską wartością promieniowania netto w 1960 r. – strumień ciepła utajonego przyjął niską wartość $65\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, co stanowiło 68% Rn. Efektem przedstawionych warunków pogodowych była niska temperatura powietrza w omawianym okresie wynosząca $13,7^{\circ}\text{C}$ (średnia z wielolecia ma $14,3^{\circ}\text{C}$).

Tabela 25

Table 25

Średnie wartości składowych bilansu cieplnego pszenicy jarej (IV–VIII) w Łodzi
Components of heat balance during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in Łódź

Rok Year	Rn	LE	G	H	LE(mm/ dekada)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1954	96	-65	-7	-24	22,8	0,68	0,25	0,07	0,37	14,1	354,2
1955	97	-66	-7	-24	23,2	0,68	0,25	0,07	0,36	13,7	321,6
1956	94	-66	-7	-21	23,3	0,70	0,22	0,07	0,32	13,1	291,7
1957	100	-69	-8	-23	24,2	0,69	0,23	0,08	0,33	14,3	429,8
1958	99	-68	-7	-24	23,9	0,69	0,24	0,07	0,35	13,9	385,4
1959	100	-67	-8	-25	23,6	0,67	0,25	0,08	0,37	15,4	240,9
1960	90	-61	-7	-22	21,5	0,68	0,24	0,08	0,36	13,7	476,7
1961	94	-63	-8	-23	22,3	0,67	0,24	0,09	0,37	14,1	387,0
1962	92	-63	-7	-22	22,1	0,68	0,24	0,08	0,35	13,5	368,9
1963	98	-67	-7	-24	23,5	0,68	0,24	0,07	0,36	15,8	245,8
1964	99	-67	-8	-24	23,6	0,68	0,24	0,08	0,36	14,9	289,3
1965	93	-66	-7	-20	23,2	0,71	0,22	0,08	0,30	12,6	314,0
1966	102	-67	-8	-27	23,6	0,66	0,26	0,08	0,40	14,7	337,8
1967	107	-70	-8	-29	24,8	0,65	0,27	0,07	0,41	14,7	282,2
1968	107	-71	-8	-28	24,8	0,66	0,26	0,07	0,39	14,7	317,1
1969	107	-70	-9	-28	24,8	0,65	0,26	0,08	0,40	14,8	403,1
1970	108	-71	-8	-29	25,1	0,66	0,27	0,07	0,41	14,0	318,7
1971	107	-67	-8	-32	23,6	0,63	0,30	0,07	0,48	15,1	306,7
1972	104	-67	-8	-29	23,5	0,64	0,28	0,08	0,43	14,6	404,5
1973	108	-68	-8	-32	24,0	0,63	0,30	0,07	0,47	13,9	353,3
1974	101	-64	-8	-29	22,6	0,63	0,29	0,08	0,45	13,2	346,5
1975	110	-70	-8	-32	24,5	0,64	0,29	0,07	0,46	15,0	285,2

Tabela 25 cd.
Table 25 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1976	113	-74	-9	-30	26,0	0,65	0,27	0,08	0,41	13,8	198,1
1977	106	-69	-8	-29	24,4	0,65	0,27	0,08	0,42	13,5	392,6
1978	106	-69	-9	-28	24,3	0,65	0,26	0,08	0,41	12,8	322,4
1979	107	-70	-9	-28	24,6	0,65	0,26	0,08	0,40	14,2	291,1
1980	98	-64	-8	-26	22,5	0,65	0,27	0,08	0,41	12,5	458,4
1981	105	-67	-9	-29	23,7	0,64	0,28	0,09	0,43	14,0	345,6
1982	114	-72	-9	-33	25,6	0,63	0,29	0,08	0,46	14,5	293,6
1983	115	-74	-9	-32	26,0	0,64	0,28	0,08	0,43	15,9	171,7
1984	101	-63	-8	-30	22,4	0,62	0,30	0,08	0,48	13,9	230,6
1985	105	-65	-8	-32	23,0	0,62	0,30	0,08	0,49	13,9	464,4
1986	110	-70	-9	-31	24,9	0,64	0,28	0,08	0,44	14,9	318,0
1987	101	-65	-8	-28	22,8	0,64	0,28	0,08	0,43	13,3	298,8
1988	107	-66	-9	-32	23,2	0,62	0,30	0,08	0,48	15,0	327,1
1989	111	-67	-9	-35	23,7	0,60	0,32	0,08	0,52	14,8	274,5
1990	108	-67	-9	-32	23,5	0,62	0,30	0,08	0,48	14,6	237,4
1991	105	-69	-8	-28	24,2	0,66	0,27	0,08	0,41	13,9	258,4
1992	112	-72	-9	-31	25,4	0,64	0,28	0,08	0,43	16,3	134,5
1993	104	-65	-9	-30	23,0	0,63	0,29	0,09	0,46	14,8	248,3
1994	107	-72	-8	-27	25,3	0,67	0,25	0,07	0,38	15,7	251,9
1995	108	-71	-8	-29	24,9	0,66	0,27	0,07	0,41	15,3	244,7

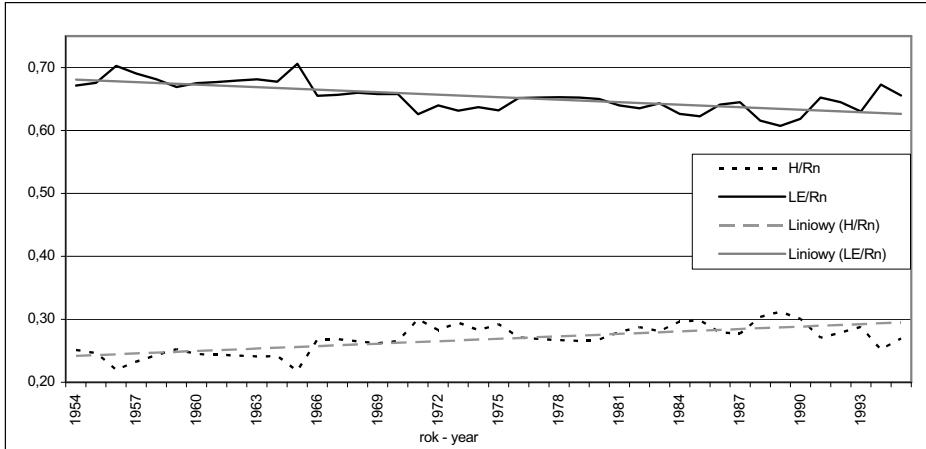
Oznaczenia jak w tab. 20
Signs as in tab. 20

Najwyższą średnią wartość promieniowania netto równą $115 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w omawianym wieloleciu odnotowano w 1983 roku. Był to okres wegetacji o wysokiej sumie usłonecznienia $1258,5 \text{ h}$ i wysokich wartościach ciśnienia pary wodnej (średnio $12,6 \text{ hPa}$). Duża ilość energii dostarczona do powierzchni czynnej w omawianym 1983 r. przy małych opadach ($171,7 \text{ mm}$) spowodowała, że najwięcej energii z całego wielolecia, czyli $74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (64%) zostało przeznaczane na parowanie. Był to również jeden z najcieplejszych okresów wegetacji o średniej temperaturze równej $15,9^\circ\text{C}$.

Strumień ciepła przeznaczanego na ogrzewanie atmosfery wynosił od $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (22% R_n) w 1965 r. o najniższej średniej temperaturze z okresu wegetacji $12,6^\circ\text{C}$ oraz

dużej prędkości wiatru równej $4,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (średnia $3,59 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (32 %Rn) w 1989 r. o nieco wyższych od przeciętnych: temperaturze, ciśnieniu pary wodnej, usłonecznieniu oraz opadach.

Strumień ciepła glebowego zawierał się w przedziale od 7 do $9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, co stanowiło od 7 do 9% promieniowania netto.



Rys. 28. Średnie wartości ilorazów H/Rn oraz LE/Rn wraz z liniami trendów w wieloleciu 1954-1995 w Łodzi

Fig. 28. Variation of mean ratio values of -H/Rn and -LE/Rn in years 1954-1995 in Łódź

Na powyższym rysunku wyraźnie zaznaczają się lata 1965 oraz 1989. Pierwszy z nich charakteryzuje się najwyższym średnim udziałem strumienia ciepła utajonego w promieniowaniu netto z całego wielolecia liczącym 71%. Był to okres wegetacji o przeciętnych opadach (314 mm) oraz niskim średnim promieniowaniu netto ($93 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). W omawianym 1965 r. średnia temperatura była bardzo niska i wyniosła $12,6^\circ\text{C}$ (przy średniej $14,3^\circ\text{C}$) oraz najniższym w całym badanym wieloleciu udziale ciepła jawnego w promieniowaniu netto (22 %). W kolejnych okresach wegetacji obserwuje się cykl spadków oraz wzrostów ilorazu -LE/Rn z tendencją malejącą aż do roku 1989, kiedy średni udział strumienia ciepła utajonego w promieniowaniu netto liczył 60%. Był to okres wegetacji o wysokim promieniowaniu netto wynoszącym $111 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ i najwyższym udziale strumienia ciepła jawnego w promieniowaniu netto (32%), czego efektem jest najwyższa wartość współczynnika Bowena w całym wieloleciu, tj. 0,52. Na rysunku 28 zostały przedstawione również linie trendów wskazujące na wzrost udziałów strumienia ciepła jawnego i jednoczesny spadek udziałów ciepła utajonego w kolejnych latach badanego wielolecia.

5.4.4. Łódź – lata o ekstremalnych opadach

W Łodzi rokiem „mokrym” był rok 1960 (476,7 mm), a rokiem „suchym” rok 1992 (134,5 mm).

Tabela 26
Table 26

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najwyższych opadach (1960)
na stacji Łódź
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the biggest
precipitation (1960) in Łódź

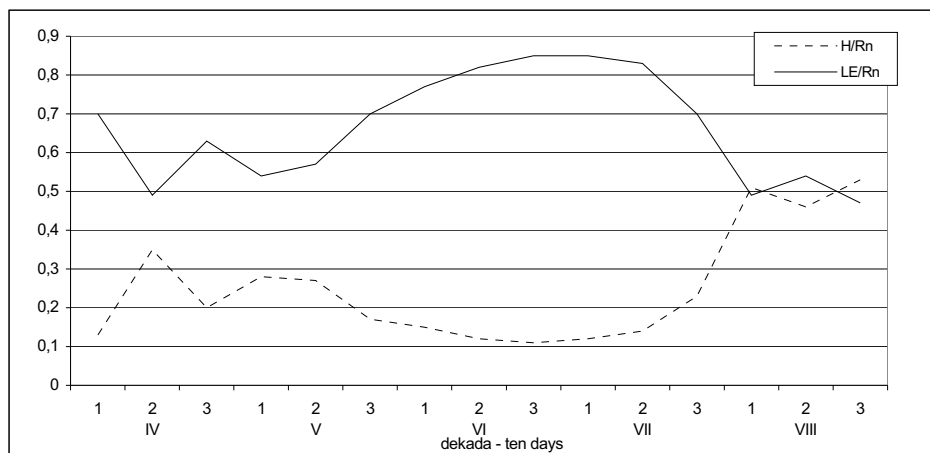
Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	T	P	P ₀	
IV	1	51	-36	-9	-6	12,8	0,70	0,12	0,18	0,17	2,9	34,3	13,4
	2	70	-34	-12	-24	12,0	0,49	0,34	0,17	0,71	10,7	2,2	11,9
	3	72	-46	-12	-14	16,1	0,64	0,19	0,17	0,30	5,5	15,9	13,2
V	1	90	-49	-16	-25	17,2	0,55	0,28	0,18	0,51	10,4	0	13,9
	2	104	-59	-17	-28	21,0	0,57	0,27	0,16	0,47	15	18,9	20,6
	3	103	-72	-13	-18	25,2	0,70	0,18	0,13	0,25	13,2	10,7	19,9
VI	1	112	-86	-9	-17	30,2	0,77	0,15	0,08	0,20	18,6	30,6	20,7
	2	99	-81	-6	-12	28,6	0,82	0,12	0,06	0,15	15,2	45,7	23,8
	3	110	-93	-5	-12	32,8	0,85	0,11	0,05	0,13	16	5,5	25,6
VII	1	99	-84	-3	-12	29,7	0,85	0,12	0,03	0,14	13,6	41,5	25,1
	2	110	-91	-3	-16	32,1	0,83	0,15	0,03	0,18	19	27,7	28,9
	3	82	-58	-5	-19	20,4	0,70	0,23	0,06	0,33	15,2	121,3	30,2
VIII	1	96	-47	0	-49	16,6	0,49	0,51	0,00	1,04	17	3,3	21,7
	2	77	-41	0	-36	14,5	0,53	0,47	0,00	0,88	15,7	80,2	23,0
	3	82	-39	0	-43	13,7	0,47	0,52	0,00	1,10	16,9	38,9	23,0
Suma – Sum											476,7	314,8	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1960 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 20

Signs: P – precipitation in 1960 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab.20

Wartości salda promieniowania w okresie wegetacji roku „mokrego” zmieniały się od 51 W·m⁻² na początku okresu wegetacji do 112 W·m⁻² w pierwszej dekadzie czerwca. Największy strumień rozchodowy LE pochłaniał od 34 do 93 W·m⁻² w ostatniej dekadzie czerwca. W kolejnych dekadach gęstość strumienia ciepła utajonego malała do 39 W·m⁻². Gęstości strumienia ciepła jawnego rosły od 6 W·m⁻² na początku okresu wegetacji do 28 W·m⁻² w drugiej dekadzie maja, następnie spadały do 12 W·m⁻² na

przełomie czerwca i lipca i dalej rosły do $49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w sierpniu. Strumień ciepła glebowego był najwyższy w drugiej dekadzie maja ($17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Na podstawie tabeli 26 można zauważyć zależność między wartościami promieniowania netto a opadami. W drugiej dekadzie czerwca wystąpił spadek wartości R_n , co pokryło się z wystąpieniem znacznej sumy opadów (45,7 mm), przekraczającej średni opad ponad dwukrotnie. Podobnie w pierwszej i trzeciej dekadzie lipca wystąpiły spadki wartości R_n w stosunku do wartości sąsiednich o około $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, co jest bezpośrednio związane z wysokością opadów, która wyniosła 41,5 oraz 121,3 mm odpowiednio.



Rys. 29. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/R_n$ oraz ciepła utajonego $-LE/R_n$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o największych opadach (1960) w Łodzi

Fig. 29. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/R_n$ and latent heat flux and net radiation $-LE/R_n$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the biggest precipitation (1960) in Łódź

Na rysunku 29 wyraźnie zaznacza się druga dekada kwietnia, w której odnotowano spadek udziałów ciepła utajonego w saldzie promieniowania (z 70 do 49%). Było to związane z bardzo małymi opadami w tej dekadzie (2,2 mm), co przy mało rozwiniętej szacie roślinnej zaowocowało znacznie większym zużyciem energii na ogrzewanie atmosfery (34%) niż w sąsiednich dekadach. W dalszej części okresu wegetacji utrzymywał się wzrost udziałów LE w R_n do ostatniej dekady czerwca (85%), następnie wystąpił spadek do 47% w końcu sierpnia. W dwóch dekadach sierpnia na ogrzewanie atmosfery zużyte zostało więcej energii niż na parowanie, czego skutkiem są wyższe od 1 wartości współczynnika Bowena (1,04 oraz 1,10) oznaczające skrajnie konwekcyjną strukturę bilansu cieplnego.

Najniższa suma opadów w Łodzi wystąpiła w 1992 roku i wyniosła 134,5 mm, co stanowi 42,7% średniej sumy opadów z okresu wegetacji pszenicy jarej dla tej stacji (tab. 27).

Tabela 27
Table 27

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najniższych opadach (1992) na stacji Łódź
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the lowest precipitation (1992) in Łódź

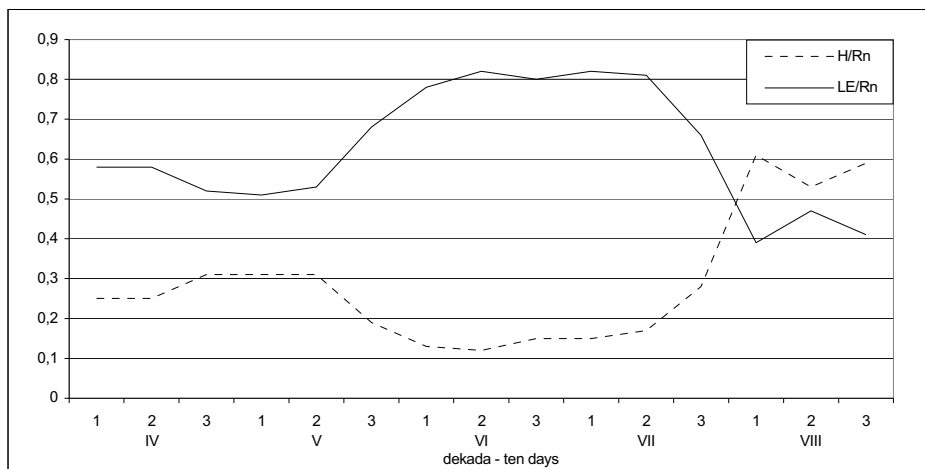
Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	T	P	P ₀	
IV	1	59	-34	-10	-15	12,0	0,58	0,25	0,17	0,44	5,9	16,2	13,4
	2	64	-37	-11	-16	13,0	0,58	0,25	0,17	0,43	7,0	5,1	11,9
	3	75	-39	-12	-24	13,8	0,52	0,32	0,16	0,62	10,3	12,1	13,2
V	1	94	-48	-17	-29	16,9	0,51	0,31	0,18	0,60	12,0	5,6	13,9
	2	125	-66	-20	-39	23,4	0,53	0,31	0,16	0,59	13,4	3,3	20,6
	3	118	-80	-15	-23	28,1	0,68	0,20	0,13	0,29	15,2	5,6	19,9
VI	1	142	-111	-12	-19	39,0	0,78	0,13	0,08	0,17	18,7	3,8	20,7
	2	128	-105	-7	-16	37,0	0,82	0,12	0,05	0,15	18,0	14,9	23,8
	3	148	-118	-7	-23	41,8	0,80	0,16	0,05	0,19	19,1	6,5	25,6
VII	1	142	-117	-4	-21	41,3	0,82	0,15	0,03	0,18	19,5	12,1	25,1
	2	123	-99	-3	-21	34,9	0,81	0,17	0,02	0,21	18,9	23,9	28,9
	3	143	-94	-9	-40	33,0	0,66	0,28	0,06	0,43	21,2	11,5	30,2
VIII	1	136	-52	0	-84	18,5	0,38	0,62	0,00	1,62	24,0	0,1	21,7
	2	84	-40	0	-44	14,0	0,47	0,52	0,00	1,10	19,1	1,7	23,0
	3	94	-39	0	-55	13,6	0,41	0,58	0,00	1,41	22,0	12,1	23,0
Suma – Sum											134,5	314,8	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1992 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 22

Signs: P – precipitation in 1992 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab. 22

W okresie wegetacji 1992 r. o najniższych opadach (134,5 mm) z wielolecia promieniowanie netto rosło od 59 W·m⁻² na początku okresu do 148 W·m⁻² w trzeciej dekadzie czerwca. W roku „suchym” wartości promieniowania netto były średnio o 23% (21,2 W·m⁻²) wyższe niż w roku „mokrym”. Ogrzewanie atmosfery pochłaniało 15 W·m⁻² na początku okresu wegetacji, następnie rosło do 39 W·m⁻² w drugiej dekadzie maja, po czym odnotowano spadek wartości H do 16 Wm⁻² w połowie czerwca. W kolejnych dekadach ciepło jawne pochłaniało coraz więcej energii, aż do 84 W·m⁻² na początku sierpnia. Strumień ciepła glebowego pochłaniał nie więcej niż 20 W·m⁻². W roku „suchym” w Łodzi jedynie w pierwszej dekadzie kwietnia opad (16,2 mm) przekroczył wartość średnią z wielolecia (13,4 mm). Mimo to promieniowanie netto

wykazało reakcję na wystąpienie opadów przekraczających 14 mm. W drugiej dekadzie czerwca wartość R_n spadła o $14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ przy opadach wynoszących 14,9 mm i w następnej dekadzie znów wzrosła o $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, osiągając $148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Podobnie w drugiej dekadzie lipca opad wynoszący 23,9 mm spowodował spadek wartości promieniowania netto o $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a następnie wystąpił ponowny wzrost o $21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ do wartości $143 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w trzeciej dekadzie tego miesiąca.



Rys. 30. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/R_n$ oraz ciepła utajonego $-LE/R_n$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o najniższych opadach (1992) w Łodzi

Fig. 30. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/R_n$ and latent heat flux and net radiation $-LE/R_n$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the lowest precipitation (1992) in Łódź

Udziały strumienia ciepła jawnego i utajonego w promieniowaniu netto w roku „suchym” były w pierwszych trzech miesiącach okresu wegetacji zdecydowanie mniej zróżnicowane niż w roku „mokrym”. Od drugiej dekady lipca do początku sierpnia wystąpił zdecydowany spadek udziałów ciepła utajonego od 81 do 39% wraz z jednoczesnym wzrostem udziałów ciepła jawnego od 17 do 61%. Przez cały sierpień ogrzewanie atmosfery pochłaniało więcej energii niż parowanie, co związane było z wysoką temperaturą sięgającą 24°C w pierwszej dekadzie sierpnia.

5.4.5. Bydgoszcz – wielolecie 1945–2004

Dla stacji Bydgoszcz badaniami objęto najdłuższe wielolecie liczące 50 lat. Średnie wartości składowych bilansu cieplnego oraz ich ilorazów, przedstawiające zmiany tego bilansu na tle całego pięćdziesięciolecia, przedstawia tabela 28.

Tabela 28
Table 28

Średnie wartości składowych bilansu ciepłego pszenicy jarej (IV–VIII) w Bydgoszczy
Components of heat balance during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in Bydgoszcz

Rok Year	Rn	LE	G	H	LE(mm/ dekada)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1945	97	-65	-8	-24	22,9	0,67	0,25	0,08	0,37	16,5	363,6
1946	106	-66	-9	-31	23,3	0,62	0,29	0,08	0,47	15,7	295,5
1947	109	-69	-9	-31	24,3	0,63	0,28	0,08	0,45	16,0	282,7
1948	103	-64	-8	-31	22,4	0,62	0,30	0,08	0,48	15,6	297,8
1949	108	-66	-9	-33	23,4	0,61	0,31	0,08	0,50	15,2	302,6
1950	106	-68	-8	-30	23,8	0,64	0,28	0,08	0,44	15,6	315,3
1951	106	-68	-8	-30	24,0	0,64	0,28	0,08	0,44	15,2	239,5
1952	106	-68	-8	-30	24,0	0,64	0,28	0,08	0,44	14,9	238,3
1953	109	-71	-8	-30	24,9	0,65	0,28	0,07	0,42	15,8	247,0
1954	98	-64	-7	-27	22,5	0,65	0,28	0,07	0,42	14,4	354,6
1955	101	-66	-8	-27	23,2	0,65	0,27	0,08	0,41	14,1	255,3
1956	98	-66	-8	-24	22,9	0,67	0,24	0,08	0,36	13,7	256,0
1957	102	-66	-8	-28	23,4	0,65	0,27	0,08	0,42	14,2	342,7
1958	101	-66	-7	-28	23,2	0,65	0,28	0,07	0,42	14,1	262,1
1959	104	-66	-8	-30	23,4	0,63	0,29	0,08	0,45	16,1	239,7
1960	92	-59	-7	-26	20,7	0,64	0,28	0,08	0,44	14,3	387,9
1961	95	-62	-8	-25	21,8	0,65	0,26	0,08	0,40	14,3	345,9
1962	94	-62	-7	-25	21,7	0,66	0,27	0,07	0,40	13,6	338,1
1963	103	-66	-8	-29	23,4	0,64	0,28	0,08	0,44	15,9	189,7
1964	102	-66	-8	-28	23,1	0,65	0,27	0,08	0,42	15,4	220,5
1965	94	-64	-7	-23	22,4	0,68	0,24	0,07	0,36	12,9	248,5
1966	95	-61	-7	-27	21,7	0,64	0,28	0,07	0,44	15,1	269,1
1967	101	-64	-8	-29	22,4	0,63	0,29	0,08	0,45	14,7	375,5
1968	105	-66	-8	-31	23,2	0,63	0,30	0,08	0,47	15	241,3
1969	105	-67	-8	-30	23,7	0,64	0,29	0,08	0,45	15,3	233,6
1970	105	-66	-8	-31	23,3	0,63	0,30	0,08	0,47	14,3	343,4
1971	106	-66	-8	-32	23,1	0,62	0,30	0,08	0,48	15,8	282
1972	93	-62	-7	-24	21,8	0,67	0,26	0,08	0,39	15,4	315,1
1973	104	-67	-8	-29	23,7	0,64	0,28	0,08	0,43	14,4	373,3
1974	95	-61	-8	-26	21,6	0,64	0,27	0,08	0,43	14	378,5
1975	103	-67	-8	-28	23,7	0,65	0,27	0,08	0,42	16,1	301,8
1976	101	-68	-8	-25	23,9	0,67	0,25	0,08	0,37	14,9	185,6

Tabela 28 cd.
Table 28 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1977	96	-65	-8	-23	23	0,68	0,24	0,08	0,35	14,4	378,3
1978	93	-62	-7	-24	21,9	0,67	0,26	0,08	0,39	14,1	183,4
1979	97	-64	-8	-25	22,5	0,66	0,26	0,08	0,39	15,5	174,7
1980	89	-58	-7	-24	20,2	0,65	0,27	0,08	0,41	13,6	599,1
1981	91	-59	-7	-25	20,6	0,65	0,27	0,08	0,42	14,9	364,2
1982	103	-66	-8	-29	23,3	0,64	0,28	0,08	0,44	15,5	175,2
1983	102	-66	-8	-28	23,3	0,65	0,27	0,08	0,42	16,6	159,9
1984	91	-60	-7	-24	21	0,66	0,26	0,08	0,40	14,9	266,8
1985	97	-61	-8	-28	21,6	0,63	0,29	0,08	0,46	15	506,6
1986	99	-63	-8	-28	22,2	0,64	0,28	0,08	0,44	15,8	254,4
1987	86	-55	-7	-24	19,6	0,64	0,28	0,08	0,44	14	258,8
1988	96	-59	-8	-29	21	0,61	0,30	0,08	0,49	15,7	262
1989	97	-63	-8	-26	22,1	0,65	0,27	0,08	0,41	16,1	99,1
1990	98	-60	-8	-30	21,2	0,61	0,31	0,08	0,50	15,8	251,1
1991	100	-65	-7	-28	22,9	0,65	0,28	0,07	0,43	14,8	235,7
1992	105	-67	-8	-30	23,7	0,64	0,29	0,08	0,45	17,1	140,5
1993	100	-63	-8	-29	22	0,63	0,29	0,08	0,46	15,4	245,9
1994	100	-64	-8	-28	22,7	0,64	0,28	0,08	0,44	16,3	184,2
1995	108	-69	-8	-31	24,4	0,64	0,29	0,07	0,45	16	207,1
1996	102	-63	-8	-31	22	0,62	0,30	0,08	0,49	15,1	328,6
1997	103	-64	-8	-31	22,6	0,62	0,30	0,08	0,48	15,2	334,6
1998	103	-61	-8	-34	21,4	0,59	0,33	0,08	0,56	15,5	314,2
1999	104	-64	-8	-32	22,6	0,62	0,31	0,08	0,50	16	317,6
2000	101	-59	-8	-34	20,9	0,58	0,34	0,08	0,58	16,4	200,8
2001	98	-59	-8	-31	20,9	0,60	0,32	0,08	0,53	15,7	365,4
2002	99	-60	-8	-31	21,1	0,61	0,31	0,08	0,52	17,3	253,6
2003	101	-61	-8	-32	21,6	0,60	0,32	0,08	0,52	16,6	218,0
2004	101	-61	-8	-32	21,58	0,60	0,32	0,08	0,52	15,03	310,6

Oznaczenia jak w tab. 22. Signs as in tab. 22.

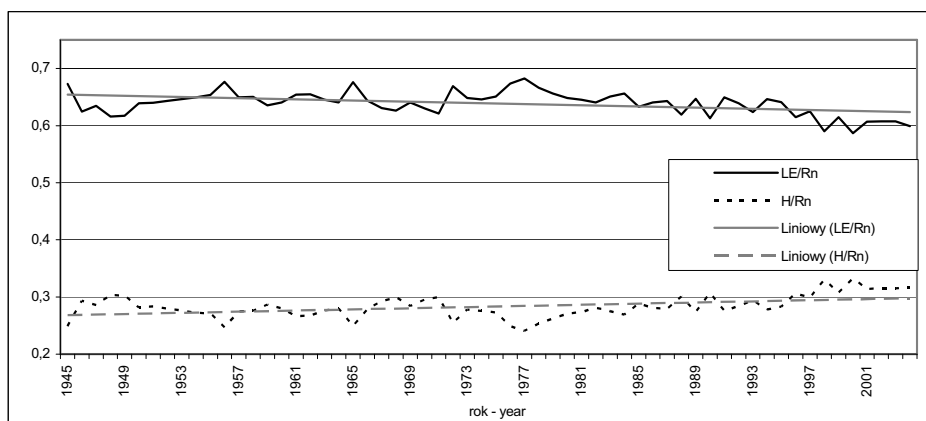
W Bydgoszczy ilość energii dostarczonej do powierzchni czynnej wyrażona średnią wartością salda promieniowania w wieloleciu ($100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) była zdecydowanie niższa niż dla wcześniej omawianych stacji (Gorzów – $103 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Łódź - $104 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Najniższa, biorąc pod uwagę badane stacje i wieloletnia, była w Bydgoszczy średnia ilość energii zużywanej na parowanie, co związane jest z najwyższą średnią temperaturą w okresie wegetacji ($15,2^\circ\text{C}$).

Wartości salda promieniowania wynosiły od $86 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1987 r., do $109 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1947 oraz 1953 roku. Rok 1953 cechował się również najwyższą średnią ilością energii zużytej na parowanie, wynoszącą $71 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ co stanowiło 65% Rn, a rok 1987 – najmniejszą ilością tej energii wynoszącą $55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (64% Rn).

Na podstawie analizy udziałów poszczególnych strumieni w promieniowaniu netto można zauważyć, że:

- 1) największa część energii była przeznaczana na parowanie: od 58% w 2000 r. do 68% w latach 1965 (o najchłodniejszym okresie wegetacji) oraz 1977;
- 2) strumień ciepła jawnego zużywał od 24% Rn w roku 1977 do 34% w roku 2000.

Regresja liniowa, wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów, wskazuje postępujące zmiany w strukturze bilansu cieplnego w Bydgoszczy (rys. 31). Zaobserwowano spadek udziałów ciepła utajonego oraz jednoczesny wzrost udziałów ciepła jawnego. Jest to związane z zasadą priorytetu parowania, według której malejące sumy opadów powodują wzrost ilości energii przeznaczanej na ogrzewanie atmosfery. Tendencje te są szczególnie widoczne w ciągu ostatnich 20 lat.



Rys. 31. Średnie wartości ilorazów $-H/Rn$ oraz $-LE/Rn$ wraz z liniami trendów w wieloleciu 1945–2004 w Bydgoszczy

Fig. 31. Variation of mean ratio values of $-H/Rn$ and $-LE/Rn$ in years 1945–2004 in Bydgoszcz

5.4.6. Bydgoszcz – lata o ekstremalnych opadach

Pośród wielolecia 1945–2004 wybrano i poddano dokładniejszej analizie lata o najwyższej oraz najniższej sumie opadów w okresie wegetacji (tab. 29).

Opad z okresu wegetacji pszenicy jarej w 1980 r. w Bydgoszczy był największy ze wszystkich rozważanych okresów we wszystkich regionach. Rok ten w Bydgoszczy charakteryzował się również największą roczną sumą opadów wynoszącą 808,9 mm przy średniej z wielolecia 1945–2004 równej 521,7 mm.

Tabela 29
Table 29

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najwyższych opadach (1980)
na stacji Bydgoszcz
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the biggest
precipitation (1980) in Bydgoszcz

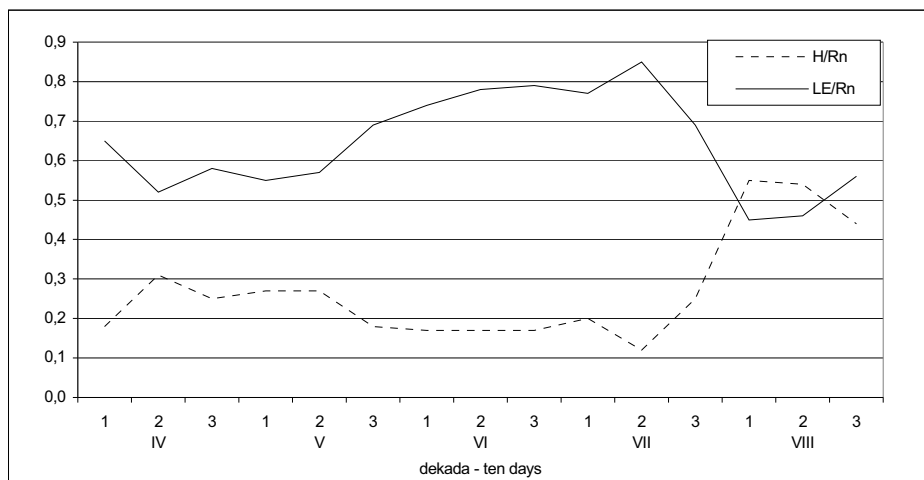
Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P	P ₀	
IV	1	48	-31	-8	-9	11	0,65	0,19	0,17	0,29	4,7	7,0	9,7
	2	68	-35	-11	-22	13	0,51	0,32	0,16	0,63	7,9	4,9	8,6
	3	68	-40	-11	-17	14	0,59	0,25	0,16	0,43	8,1	21,5	12,0
V	1	90	-50	-16	-24	18	0,56	0,27	0,18	0,48	8,3	11,7	16,1
	2	112	-64	-18	-30	23	0,57	0,27	0,16	0,47	10,2	0,5	18,7
	3	96	-66	-13	-17	23	0,69	0,18	0,14	0,26	12,4	12,7	16,0
VI	1	120	-89	-10	-21	31	0,74	0,18	0,08	0,24	16,5	68,1	16,7
	2	100	-77	-6	-17	27	0,77	0,17	0,06	0,22	17,5	189,7	20,0
	3	101	-79	-5	-17	28	0,78	0,17	0,05	0,22	14,5	58,7	19,6
VII	1	87	-67	-2	-18	24	0,77	0,21	0,02	0,27	15,9	109,3	24,0
	2	90	-77	-2	-11	27	0,86	0,12	0,02	0,14	16,2	65,8	29,3
	3	90	-62	-6	-22	22	0,69	0,24	0,07	0,35	19,6	17,2	27,5
VIII	1	103	-46	0	-57	16	0,45	0,55	0,00	1,24	20,0	1,3	17,8
	2	94	-43	0	-51	15	0,46	0,54	0,00	1,19	17,6	4,3	18,9
	3	63	-35	0	-28	12	0,56	0,44	0,00	0,80	14,6	26,4	22,0
Suma – Sum											599,1	281,6	

Oznaczenia: P – opady w roku 1980 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 20

Signs: P – precipitation in 1980 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab. 20

Promieniowanie netto w omawianym okresie rosło od $48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w pierwszej dekadzie kwietnia do $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na początku czerwca z załamaniem ($96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) w ostatniej dekadzie maja. Efektem utrzymujących się wysokich opadów ($189,7$, $58,7$, $109,3$, $65,8$ mm) na przełomie czerwca i lipca były wartości promieniowania netto nie przekraczające $90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Dopiero pierwsza dekada sierpnia, z minimalnymi opadami, cechowała się wartością Rn wynoszącą $103 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Strumień ciepła utajonego pochłonął od $31 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na początku okresu do $89 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w dekadzie o najwyższym saldzie promieniowania. Udział energii przeznaczony na parowanie w promieniowaniu netto przedstawia się nieco inaczej. Najmniejsza część salda promieniowania została zużyta na ewapotranspirację na początku sierpnia (45%), gdy udział strumienia ciepła jawnego był naj-

większy (55%), a największa w połowie lipca (86%), gdy udziały strumieni ciepła jawnego i glebowego były najmniejsze (odpowiednio 12 i 2%). Biorąc pod uwagę wartości współczynnika Bowena w poszczególnych dekadach, można stwierdzić, że do połowy maja struktura bilansu cieplnego pszenicy w roku „mokrym” w Bydgoszczy wykazuje charakter konwekcyjny, następnie przechodzi w ewaporacyjny lub ewaporacyjno-konwekcyjny, a w sierpniu jest silnie lub skrajnie konwekcyjny.



Rys. 32. Udziały strumienia ciepła jawnego- H/Rn oraz ciepła utajonego-LE/Rn w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o największych opadach (1980) w Bydgoszczy

Fig. 32. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation -H/Rn and latent heat flux and net radiation -LE/Rn during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the biggest precipitation (1980) in Bydgoszcz

Na rysunku 32 przedstawiającym wartości udziałów strumieni ciepła jawnego oraz utajonego w saldzie promieniowania w roku „mokrym” w Bydgoszczy zaznacza się podobna zmienność sezonowa jak we wcześniej omawianych rejonach. Przez pierwsze pięć dekad okresu wegetacji zmienność udziałów jest niewielka. Od połowy maja obserwuje się wzrost udziałów ciepła utajonego i jednoczesny, choć zdecydowanie mniejszy, spadek udziałów ciepła jawnego, co jest związane ze spadkiem udziałów ciepła glebowego. W pierwszej dekadzie sierpnia nastąpił gwałtowny spadek udziałów ciepła utajonego w Rn, aż do przekroczenia udziałów ciepła jawnego w Rn, czego efektem są wartości współczynnika Bowena przekraczające 1.

W okresie wegetacji charakteryzującym się niskimi sumami opadów obserwuje się wyższe niż w roku „mokrym” wartości salda promieniowania przekraczające $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w ciągu 9 dekad maja, czerwca i lipca, dochodząc do $125 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Wartości promieniowania netto wynikają z wyższych sum usłonecznienia przy małym zachmurzeniu. W okresach suchych, szczególnie w lipcu, więcej energii (do 87%) jest zużywane na parowanie powierzchni niż w latach o wysokich opadach. W sierpniu – wyraźnie większa część energii (do 59%) przeznaczana jest na ogrzewanie atmosfery w okresach suchych niż w mokrych. Współczynnik Bowena w sierpniu osiąga wartość nawet 1,45, co

oznacza, że na ogrzewanie atmosfery w tym okresie jest przeznaczane o 45% więcej energii niż na parowanie. Wartości współczynnika Bowena wskazują na charakter konwekcyjny bilansu cieplnego, przechodzący w silnie konwekcyjny do połowy maja. Od trzeciej dekady maja do końca sierpnia roku „suchego” struktura bilansu cieplnego jest ewaporacyjna lub ewaporacyjno-konwekcyjna, a w sierpniu skrajnie konwekcyjna. W porównaniu z rokiem „mokrym” w Bydgoszczy rok „suchy” charakteryzują wyższe wartości współczynnika Bowena (tab. 30).

Tabela 30

Table 30

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najniższych opadach (1989)

na stacji Bydgoszcz

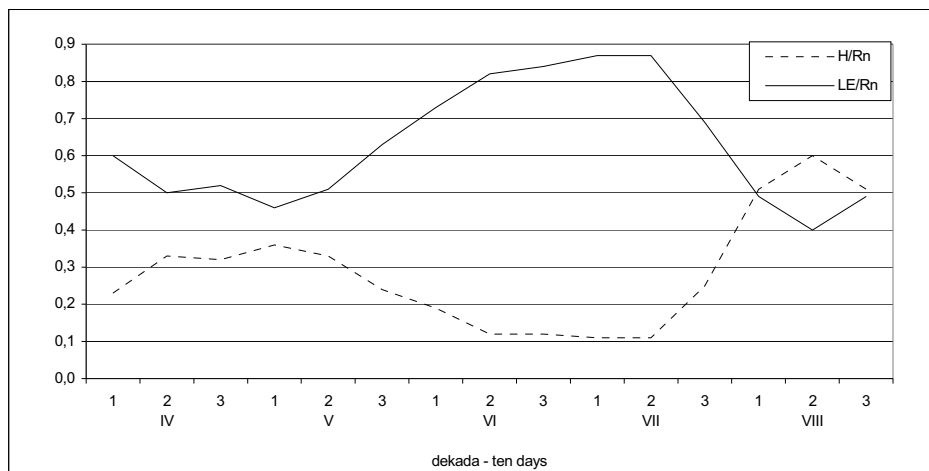
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the lowest precipitation (1989) in Bydgoszcz

Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P	P ₀	
IV	1	51	-31	-9	-11	10,8	0,61	0,22	0,18	0,35	5,8	7,4	9,7
	2	58	-29	-10	-19	10,2	0,50	0,33	0,17	0,66	12,3	0,2	8,6
	3	74	-39	-12	-23	13,6	0,53	0,31	0,16	0,59	10,6	9,5	12,0
V	1	104	-48	-19	-37	17,0	0,46	0,36	0,18	0,77	12,2	2,6	16,1
	2	109	-56	-17	-36	19,5	0,51	0,33	0,16	0,64	16,1	6	18,7
	3	125	-78	-17	-30	27,5	0,62	0,24	0,14	0,38	17,1	0,3	16,0
VI	1	102	-74	-8	-20	26,0	0,73	0,20	0,08	0,27	14,7	6,3	16,7
	2	112	-92	-6	-14	32,4	0,82	0,13	0,05	0,15	15,7	7,8	20,0
	3	117	-98	-5	-14	34,5	0,84	0,12	0,04	0,14	20,9	4,1	19,6
VII	1	122	-106	-3	-13	37,2	0,87	0,11	0,02	0,12	22,4	0,9	24,0
	2	108	-94	-3	-11	33,2	0,87	0,10	0,03	0,12	17	14,8	29,3
	3	114	-79	-7	-28	27,9	0,69	0,25	0,06	0,35	20,2	4,2	27,5
VIII	1	93	-46	0	-47	16,2	0,49	0,51	0,00	1,02	16,4	14,9	17,8
	2	98	-40	0	-58	13,9	0,41	0,59	0,00	1,45	23,5	0	18,9
	3	71	-35	0	-36	12,2	0,49	0,51	0,00	1,03	17,1	20,1	22,0
Suma – Sum											99,1	281,6	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1989 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 20

Signs: P – precipitation in 1989 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab. 20

Ogólna zmienność czasowa wartości udziałów ciepła utajonego oraz jawnego w promieniowaniu netto jest podobna dla roku „mokrego” i „suchego”. Jednak przy niskich opadach widoczne są mniejsze różnice między LE/R_n , a H/R_n , na początku okresu wegetacji, następnie gwałtowny przrost udziałów strumienia ciepła utajonego nad udziałami ciepła jawnego (współczynnik Bowena od 0,12 do 0,15 przez cztery dekadę), a w sierpniu udziały strumienia ciepła jawnego przekraczające 50% (rys. 33).



Rys. 33. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/R_n$ oraz ciepła utajonego $-LE/R_n$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o najmniejszych opadach (1989) w Bydgoszczy

Fig. 33. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/R_n$ and latent heat flux and net radiation $-LE/R_n$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the lowest precipitation (1989) in Bydgoszcz

5.4.7. Wrocław-Swojec – wielolecie 1964–2000

W rejonie Wrocławia badaniami objęte było wielolecie 1964–2000. Poniżej przedstawiono analizę średnich wartości składowych bilansu cieplnego i ich związek z opadem oraz temperaturą w poszczególnych latach (tab. 31).

Średnia wartość promieniowania netto z całego wielolecia była we Wrocławiu najniższa ze wszystkich regionów w badanych wieloleciach i wyniosła $99,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Najwyższa wartość zarówno salda promieniowania, jak i strumienia ciepła jawnego we Wrocławiu wystąpiła w 1994 r. i była równa 112 W i $73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ odpowiednio. Był to rok ciepły, o średniej temperaturze z okresu wegetacji o $1,2^\circ\text{C}$ wyższej od przeciętnej wynoszącej $14,9^\circ\text{C}$ oraz o opadzie niższym od przeciętnej o $66,9 \text{ mm}$. Najniższa ilość energii została dostarczona do powierzchni w 1980 r. ($90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), wtedy również bardzo mało energii zostało zużyte na ogrzewanie atmosfery ($23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), co stanowiło 25% R_n .

Tabela 31

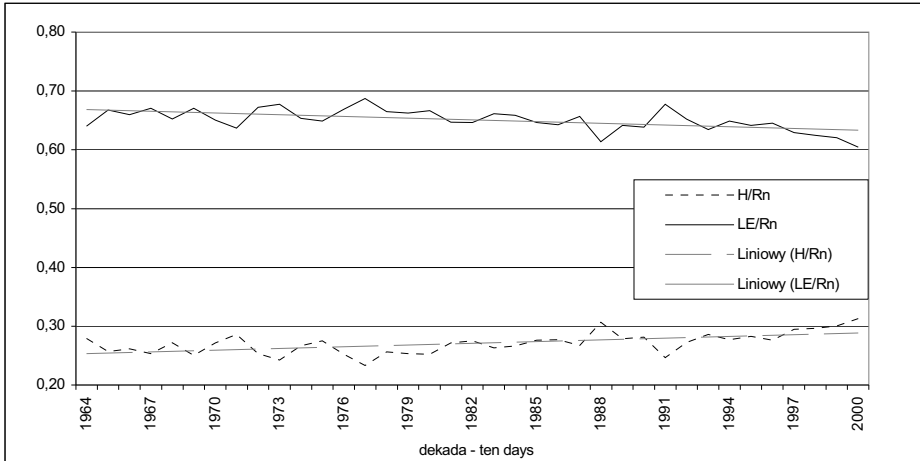
Table 31

Średnie wartości składowych bilansu cieplnego pszenicy jarej (IV–VIII) we Wrocławiu-Swojcu
 Components of heat balance during the growing season of spring wheat (IV–VIII)
 in Wrocław-Swojec

Rok Year	Rn	LE	G	H	LE(mm/ dekada)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P
1964	106	-68	-9	-29	24,0	0,64	0,27	0,08	0,43	15,1	401,1
1965	91	-61	-7	-23	21,5	0,67	0,25	0,08	0,38	13,5	442,0
1966	96	-63	-8	-25	22,2	0,66	0,26	0,08	0,40	15,0	364,7
1967	97	-65	-7	-25	23,0	0,67	0,26	0,07	0,38	15,0	280,7
1968	100	-65	-8	-27	23,0	0,65	0,27	0,08	0,42	14,8	380,2
1969	100	-67	-8	-25	23,6	0,67	0,25	0,08	0,37	15,1	239,7
1970	100	-65	-8	-27	22,9	0,65	0,27	0,08	0,42	14,5	370,5
1971	101	-64	-8	-29	22,8	0,63	0,29	0,08	0,45	15,5	356,3
1972	95	-64	-7	-24	22,5	0,67	0,25	0,07	0,38	14,9	383,8
1973	93	-63	-7	-23	22,3	0,68	0,25	0,08	0,37	14,6	249,3
1974	92	-60	-7	-25	21,3	0,65	0,27	0,08	0,42	13,8	293,6
1975	98	-63	-8	-27	22,3	0,64	0,28	0,08	0,43	15,2	337,2
1976	99	-66	-8	-25	23,4	0,67	0,25	0,08	0,38	14,8	273,3
1977	92	-64	-7	-21	22,4	0,70	0,23	0,08	0,33	14,0	420,9
1978	96	-64	-8	-24	22,5	0,67	0,25	0,08	0,38	13,3	381,6
1979	95	-63	-8	-24	22,2	0,66	0,25	0,08	0,38	14,7	202,6
1980	90	-60	-7	-23	21,2	0,67	0,26	0,08	0,38	13,1	438,0
1981	96	-62	-8	-26	21,9	0,65	0,27	0,08	0,42	14,7	388,4
1982	102	-66	-8	-28	23,2	0,65	0,27	0,08	0,42	14,9	280,5
1983	98	-65	-7	-26	22,8	0,66	0,27	0,07	0,40	16,1	284,3
1984	89	-59	-7	-23	20,8	0,66	0,26	0,08	0,39	13,8	325,5
1985	96	-62	-7	-27	21,9	0,65	0,28	0,07	0,44	14,7	429,2
1986	103	-66	-8	-29	23,3	0,64	0,28	0,08	0,44	15,0	480,3
1987	95	-63	-7	-25	22,1	0,66	0,26	0,07	0,40	14,0	353,0
1988	104	-64	-8	-32	22,6	0,62	0,31	0,08	0,50	15,2	250,5
1989	102	-65	-8	-29	23,1	0,64	0,28	0,08	0,45	15,1	263,7
1990	102	-65	-8	-29	22,9	0,64	0,28	0,08	0,45	15,2	226,8
1991	97	-66	-7	-24	23,3	0,68	0,25	0,07	0,36	14,5	246,1
1992	106	-69	-8	-29	24,5	0,65	0,27	0,08	0,42	16,9	161,0
1993	105	-67	-8	-30	23,6	0,64	0,29	0,08	0,45	15,3	260,9
1994	112	-73	-8	-31	25,7	0,65	0,28	0,07	0,42	16,1	259,5
1995	109	-70	-8	-31	24,7	0,64	0,28	0,07	0,44	15,7	365,6
1996	103	-66	-8	-29	23,4	0,64	0,28	0,08	0,44	14,8	313,7
1997	107	-67	-8	-32	23,7	0,63	0,30	0,07	0,48	15,2	493,8
1998	105	-66	-8	-31	23,2	0,63	0,30	0,08	0,47	16,0	278,6
1999	107	-67	-8	-32	23,5	0,63	0,30	0,07	0,48	15,9	313,1
2000	108	-65	-9	-34	23,0	0,60	0,31	0,08	0,52	16,3	284,8

Oznaczenia jak w tab. 20, Signs as in tab. 20.

Wśród 37 lat objętych badaniami wyróżniają się również lata 1977 oraz 2000. W 1977 roku o wysokich opadach wynoszących 420,9 mm, średniej temperaturze równej 14°C (nieco niższej od średniej wynoszącej 14,9°C) największa część energii została zużyta na parowanie (69% Rn), a na ogrzewanie atmosfery 24% Rn. W efekcie rok ten charakteryzuje się najniższą wartością współczynnika Bowena równą 0,34. Okres wegetacji 2000 r. odznaczał się najmniejszą procentową możliwością zużycia energii na parowanie (60%) i jednocześnie największym jej zużyciem na ogrzewanie atmosfery (31%). W efekcie w roku tym odnotowano największą średnią wartość współczynnika z okresu IV–VIII wynoszącą 0,52. Meteorologicznie rok 2000 był ciepły (średnia temperatura 16,3°C) z opadem zbliżonym do przeciętnego (284,8 mm).



Rys. 34. Średnie wartości ilorazów $-H/Rn$ oraz $-LE/Rn$ wraz z liniami trendów w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu-Swojcu

Fig. 34. Variation of mean ratio values of $-H/Rn$ and $-LE/Rn$ in years 1964–2000 in Wrocław-Swojec

Regresja liniowa wskazuje na zmiany w strukturze bilansu cieplnego pszenicy w regionie Wrocławia polegające na spadku udziałów strumienia ciepła utajonego w saldzie promieniowania i jednoczesnym wzroście udziałów strumienia ciepła przeznaczanego na ogrzewanie atmosfery (rys. 34).

5.4.8. Wrocław-Swojec – lata o ekstremalnych opadach

Z wielolecia 1964–2000 wybrano i poddano dokładniejszej analizie lata o najwyższych i najniższych opadach.

Najwyższa suma opadów wystąpiła we Wrocławiu w okresie wegetacji pszenicy jarej w 1997 r., w którym rejon ten dotknęła klęska powodzi (tab. 32).

Tabela 32
Table 32

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najwyższych opadach (1997) na stacji Wrocław-Swojec
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the biggest precipitation (1997) in Wrocław-Swojec

Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P	P ₀	
IV	1	60	-33	-10	-17	11,7	0,55	0,28	0,17	0,52	5,8	15,8	12,0
	2	62	-42	-10	-10	14,9	0,68	0,16	0,16	0,24	3,6	20,5	13,5
	3	82	-43	-13	-26	15,1	0,52	0,32	0,16	0,60	9,4	4,4	13,3
V	1	94	-48	-17	-29	16,8	0,51	0,31	0,18	0,60	13,2	10,2	18,7
	2	133	-65	-21	-47	23,1	0,49	0,35	0,16	0,72	19,0	10,3	16,3
	3	100	-68	-13	-19	24,1	0,68	0,19	0,13	0,28	10,6	44,0	21,8
VI	1	141	-102	-12	-27	36,1	0,72	0,19	0,09	0,26	16,2	0,1	18,9
	2	126	-102	-7	-17	35,8	0,81	0,13	0,06	0,17	17,6	11,4	28,6
	3	119	-101	-5	-13	35,6	0,85	0,11	0,04	0,13	18,8	49,3	25,3
VII	1	113	-93	-3	-17	33,0	0,82	0,15	0,03	0,18	18,1	91,2	31,6
	2	109	-88	-3	-18	31,4	0,81	0,17	0,03	0,20	17,7	134,4	30,0
	3	117	-77	-7	-33	27,2	0,66	0,28	0,06	0,43	19,1	24,1	24,3
VIII	1	113	-50	0	-63	17,8	0,44	0,56	0,00	1,26	18,5	15,1	28,4
	2	126	-49	0	-77	17,4	0,39	0,61	0,00	1,57	20,4	0,0	19,0
	3	104	-43	0	-61	15,0	0,41	0,59	0,00	1,42	19,3	63,0	24,8
Suma – Sum											493,8	324,2	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1997 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 22

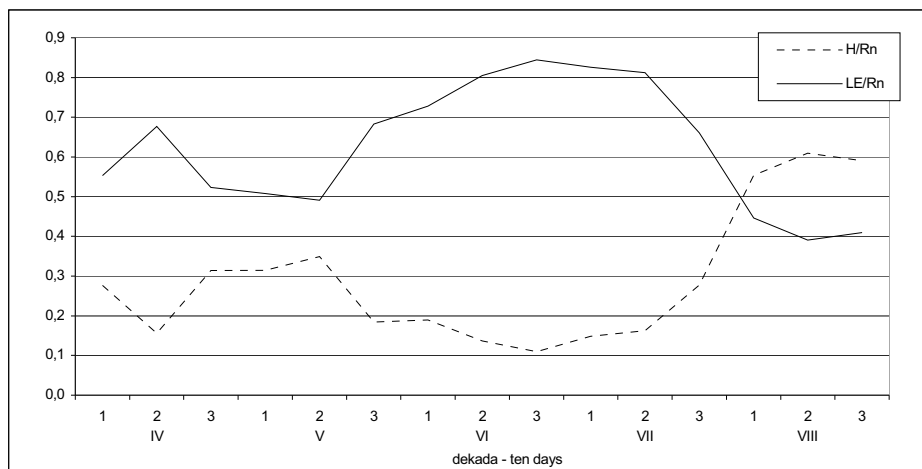
Signs: P – precipitation in 1997 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab. 22

Początek okresu wegetacji 1997 r. był, ze względu na wartości opadów, temperaturę oraz przebiegi wartości składowych bilansu cieplnego, przeciętny. Do połowy czerwca opady przekroczyły wartości przeciętne jedynie w trzech dekadach: pierwszej i drugiej kwietnia oraz trzeciej maja odpowiednio o 31,7, 51,8 oraz 102%. W tym okresie również wartości promieniowania netto były wysokie i sięgały 141 W·m⁻². Wyraźnie zauważalny jest związek opadu z ostatniej dekady maja na wartości Rn, które spadły w tej dekadzie o 33 W·m⁻², następnie wzrosły o 41 W·m⁻². Wysokie opady będące jedną z przyczyn powodzi rozpoczęły się w końcu czerwca i utrzymywały się przez trzy dekady, przekraczając wartości przeciętne opadów dla tych dekad o 94, 189 oraz 348% odpowiednio. Promieniowanie netto wyraźnie zmniejszyło się w wymienionych deka-

dach i spadło poniżej $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. W bezopadowej drugiej dekadzie sierpnia wartość Rn wzrosła do $126 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Fakt ten w powiązaniu z największym 61% udziałem strumienia ciepła jawnego w promieniowaniu netto dał w efekcie najwyższą średnią temperaturę dekadową w tym okresie równą $20,4^\circ\text{C}$.

Ze względu na przedstawioną powyżej charakterystykę okresu wegetacji 1997 r. średnie wartości temperatury ($15,2^\circ\text{C}$), ciśnienia pary wodnej ($12,5 \text{ hPa}$) oraz wiatru ($3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) były zbliżone do przeciętnych wieloletnich. Jedyne usłonecznienie wynoszące $1114,5 \text{ h}$ przekroczyło znacznie średnią wartość ($937,5 \text{ h}$), gdyż w dekadach o opadach niższych od przeciętnych usłonecznienie czterokrotnie przekraczało 1500 h .

Na rysunku 35 przedstawiającym udziały głównych strumieni rozchodowych bilansu cieplnego w saldzie promieniowania wyraźnie zaznacza się sierpień, kiedy przez trzy dekady więcej energii było przeznaczane na ogrzewanie atmosfery niż na parowanie.



Rys. 35. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/Rn$ oraz ciepła utajonego $-LE/Rn$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) w roku o największych opadach (1997) we Wrocławiu-Swojcu

Fig. 35. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/Rn$ and latent heat flux and net radiation $-LE/Rn$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the biggest precipitation (1997) in Wrocław-Swojcu

Dla porównania struktury bilansu cieplnego w roku „mokrym” oraz „suchym” przedstawiono poniżej szczegółowe wartości składowych bilansu cieplnego w roku „suchym” we Wrocławiu (tab. 33).

Okres wegetacji 1992 r. był „suchy” i charakteryzował się najwyższą średnią temperaturą równą $16,9^\circ\text{C}$ z całego wielolecia 1964–2000. W omawianym czasie odnotowano najniższy opad (161 mm) oraz wysoką sumę usłonecznienia wynoszącą $1180,5 \text{ h}$, co stanowi 120% wartości przeciętnej z wielolecia. W efekcie dużego usłonecznienia w kolejnych dekadach ilość energii dostarczanej do powierzchni czynnej rosła od $52 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na początku okresu do $143 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w ostatniej dekadzie czerwca. Podczas wzrostu stwierdzono jedno załamanie w drugiej dekadzie czerwca, związane w wystąpieniem

opadu wyższego od przeciętnego dla tej dekady wynoszącego 36,9 mm. Ze względu na duże ilości energii dostarczonej do powierzchni również strumienie rozchodowe przyjmują wysokie wartości: od 30 do 118 $W \cdot m^{-2}$ dla ciepła utajonego oraz od 13 do 78 $W \cdot m^{-2}$ dla ciepła jawnego, z analogicznym jak dla Rn załamaniem.

Tabela 33

Table 33

Składowe bilansu cieplnego pszenicy jarej w roku o najniższych opadach (1992)

na stacji Wrocław-Swojec

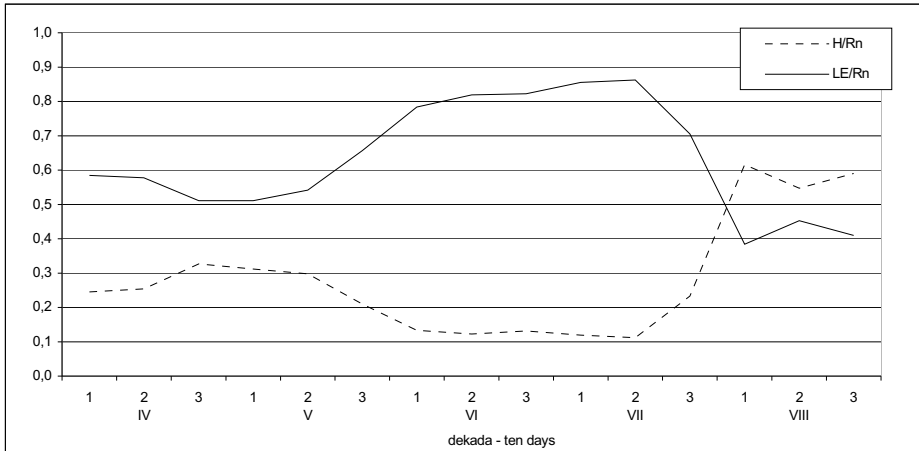
Components of heat balance during the growing season of spring wheat in year with the lowest precipitation (1992) in Wrocław-Swojec

Dekada Ten-days	Rn	LE	G	H	LE(mm)	-LE/Rn	-H/Rn	-G/Rn	H/LE	t	P	P ₀	
IV	1	52	-30	-9	-13	10,7	0,58	0,25	0,17	0,43	6,7	7,9	12,0
	2	58	-33	-10	-15	11,8	0,57	0,26	0,17	0,45	8,2	2,2	13,5
	3	76	-39	-12	-25	13,7	0,51	0,33	0,16	0,64	11,7	5,9	13,3
V	1	90	-46	-16	-28	16,3	0,51	0,31	0,18	0,61	13	8,4	18,7
	2	117	-63	-19	-35	22,4	0,54	0,30	0,16	0,56	14,6	7,0	16,3
	3	126	-82	-17	-27	29,1	0,65	0,21	0,13	0,33	15,9	0,1	21,8
VI	1	129	-101	-11	-17	35,6	0,78	0,13	0,09	0,17	19	3,7	18,9
	2	115	-94	-7	-14	33,2	0,82	0,12	0,06	0,15	18,5	36,9	28,6
	3	143	-118	-6	-19	41,5	0,83	0,13	0,04	0,16	19,5	1,8	25,3
VII	1	127	-109	-3	-15	38,4	0,86	0,12	0,02	0,14	19,9	20,7	31,6
	2	120	-103	-3	-14	36,4	0,86	0,12	0,03	0,14	19,8	8,4	30,0
	3	131	-93	-8	-30	32,7	0,71	0,23	0,06	0,32	21,7	0,4	24,3
VIII	1	127	-49	0	-78	17,2	0,39	0,61	0,00	1,59	24,3	30,9	28,4
	2	94	-43	0	-51	14,9	0,46	0,54	0,00	1,19	18,9	21,0	19,0
	3	93	-38	0	-55	13,4	0,41	0,59	0,00	1,45	22,4	5,7	24,8
Suma – Sum											161,0	324,2	

Oznaczenia: P – suma opadów w roku 1992 (mm), P₀ – średnia suma opadów z wielolecia, pozostałe oznaczenia jak w tab. 20

Signs: P – precipitation in 1992 (mm), P₀ – mean of precipitation in many years, another signs as in tab. 20

W czerwcu i lipcu przez 4 dekady utrzymywał się ponad 80% udział strumienia energii przeznaczanej na parowanie (rys. 36). Ciepło jawne pochłaniało najmniejszą część energii nie przekraczającą 13% w czerwcu i pierwszych dwóch dekadach lipca. W sierpniu, podobnie jak w przypadku lat „suchych” dla pozostałych stacji, wartość współczynnika Bowena przekraczała 1 (od 1,21 do 1,60).

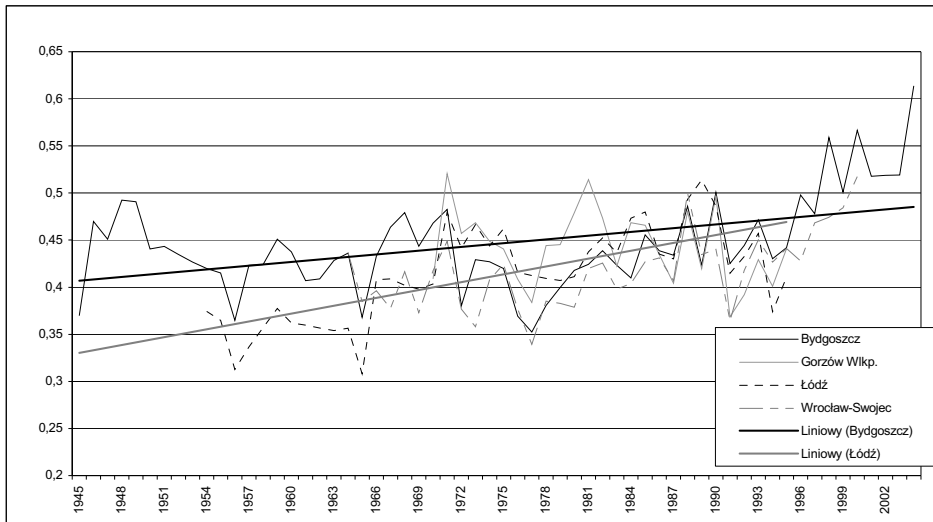


Rys. 36. Udziały strumienia ciepła jawnego $-H/R_n$ oraz ciepła utajonego $-LE/R_n$ w promieniowaniu netto w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII) o najniższych opadach (1992) we Wrocławiu

Fig. 36. Variation of mean ratio values of sensible heat flux and net radiation $-H/R_n$ and latent heat flux and net radiation $-LE/R_n$ during the growing season of spring wheat (IV–VIII) in year with the lowest precipitation (1992) in Wrocław-Swojec

5.4.9. Współczynnik Bowena

Na podstawie średnich wartości współczynnika Bowena, wyznaczonych dla każdego z rozważanych okresów wegetacji pszenicy jarej w badanych rejonach, można stwierdzić, że przeciętnie bilans w tych rejonach wykazuje strukturę ewaporacyjno-konwekcyjną, przechodzącą w ostatnich latach w konwekcyjną. Na rysunku 37 zaznaczono regresję liniową wyznaczoną dla wartości pochodzących ze stacji o najdłuższych ciągach danych (Bydgoszcz oraz Łódź), która wyraźnie wskazuje na szybki wzrost wartości tego ilorazu, oznaczający wzrost ilości ciepła opuszczającego powierzchnię czynną w postaci ciepła przeznaczanego na ogrzewanie atmosfery. Tempo tego wzrostu w Łodzi i Wrocławiu-Swojcu wynosi 0,2 na 100 lat, w Bydgoszczy wzrost jest dwukrotnie wolniejszy (0,1 na 100 lat). Dla Gorzowa Wielkopolskiego, ze względu na krótki ciąg danych, równanie regresji okazało się statystycznie nieistotne, pozostałe są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$.



Rys. 37. Średnie wartości współczynnika Bowena z okresu wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII)
 Fig. 37. Variation of mean Bowens ratio values (H/LE) in vegetation period of spring wheat (IV–VIII)

Wzrost wartości współczynnika Bowena oznacza zmianę struktury w kierunku bardziej intensywnego ogrzewania atmosfery, kosztem energii przeznaczanej na parowanie.

6. Dyskusja i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań modelowych można stwierdzić sezonową zmienność elementów klimatycznego bilansu wodnego we wszystkich badanych regionach.

Średnie dekadowe wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej we wszystkich rejonach osiągają najniższe sumy miesięczne w kwietniu, na początku okresu wegetacji pszenicy jarej (wynoszące od 54,7 mm w Bydgoszczy do 69,2 mm we Wrocławiu). W kolejnych miesiącach okresu wegetacji średnie wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej rosną z niewielkimi wahaniami do końca lipca (osiągając w ostatniej jego dekadzie wartości od 36,2 mm w Bydgoszczy do 42,1 mm we Wrocławiu). W sierpniu odnotowano ponowne spadki wartości ET_0 . Na podstawie średnich sum ewapotranspiracji wskaźnikowej z całego okresu wegetacji pszenicy (IV–VIII) można stwierdzić, że największe możliwości atmosfery do przyjmowania wilgoci występują w rejonie Łodzi (504,8 mm), a najmniejsze w Bydgoszczy (434,5 mm). W badanych rejonach zaobserwowano dla ET_0 asymetrię prawostronną oraz najmniejsze zróżnicowanie ze wszystkich elementów klimatycznego bilansu wodnego (od $s = 34,6$ mm oraz $Vs = 8\%$ w Bydgoszczy do $s = 60,4$ mm i $Vs = 12,7\%$ w Gorzowie Wielkopolskim).

Opad wykazuje zdecydowanie mniejsze regularności, czego potwierdzeniem są wartości odchylenia standardowego (s) oraz współczynnika zmienności (Vs) wyznaczone dla sum z całego okresu IV–VIII wynoszące od $s=68,2$ mm, $Vs=25,6\%$ w Gorzowie Wielkopolskim do $s = 84,2$ mm, $Vs = 30\%$ w Bydgoszczy. Wśród rozważanych 15 dekad okresu wegetacji w Gorzowie Wielkopolskim – trzy, we Wrocławiu – dwie, a w Bydgoszczy i Łodzi żadna dekada nigdy nie była bezopadowa. Najmniejsze średnie sumy opadów odnotowano w Gorzowie Wielkopolskim (266 mm), a największe we Wrocławiu (326 mm).

Klimatyczny bilans wodny jako różnica między opadem i ewapotranspiracją wskaźnikową wykazuje największe zróżnicowanie w kolejnych latach badanych wieloleci. Najmniejsze zróżnicowanie, mierzone współczynnikiem zmienności Vs , odnotowano w Gorzowie Wielkopolskim (53,5%), a największe w Bydgoszczy (69,4%). We wszystkich stacjach średnie wartości KBW zarówno dekadowe, jak i miesięczne oraz z całego okresu IV–VIII są ujemne, co oznacza stały niedobór wody. Największe średnie miesięczne niedobory wystąpiły w maju w Łodzi (47,3 mm) i we Wrocławiu (41,5 mm), w czerwcu w Bydgoszczy (45 mm) oraz w lipcu w Gorzowie Wielkopolskim (54,5 mm). Przesunięcie maksimum w czasie sięgające dwóch miesięcy spowodowane jest bardzo zróżnicowanymi wartościami sum opadów zarówno dekadowych, jak i miesięcznych. Sumy opadu dekadowego wynosiły od 0,0 do 116,6 mm w Gorzowie Wielkopolskim, 136,6 mm w Łodzi, 152,9 mm we Wrocławiu oraz 189,7 mm w Bydgoszczy. W badanych wieloleciach sporadycznie występowały okresy wegetacji o dodatniej wartości klimatycznego bilansu wodnego. W Gorzowie Wielkopolskim był to jeden

rok, we Wrocławiu dwa lata, a w Łodzi i Bydgoszczy trzy lata. Największe niedobory wody mierzone sumami klimatycznego bilansu wodnego z okresu IV–VIII wystąpiły w Gorzowie Wielkopolskim (-217 mm), a najmniejsze w Bydgoszczy (-154 mm). Zatem podczas okresu wegetacji pszenica korzysta głównie z pozimowych zapasów wody retencjonowanych w glebie, które wyczerpują się w miarę rozwoju łąnu.

Na podstawie analizy wyznaczonych wartości składowych bilansu cieplnego dla czterech badanych stacji można stwierdzić, że podobnie jak składowe klimatycznego bilansu wodnego wykazują one wyraźną zmienność sezonową w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII). Wartości promieniowania netto rosną od początku okresu wegetacji do pierwszej dekady czerwca. Następnie w zależności od warunków atmosferycznych, a w szczególności opadów i zachmurzenia, wahają się do końca lipca. W sierpniu niemal we wszystkich latach obserwuje się spadek wartości Rn. Najwyższy średni przychód energii do powierzchni czynnej mierzony gęstością strumienia promieniowania netto wystąpił w Łodzi ($104 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), nieco niższy ($103 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) w Gorzowie Wielkopolskim. W Bydgoszczy i Wrocławiu przychód ten wynosił $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Najwyższe średnie wartości dekadowe Rn sięgające $130 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w pierwszej dekadzie lipca odnotowano w Gorzowie Wielkopolskim. W latach „mokrych” dla wszystkich rejonów, z wyjątkiem Wrocławia, średnie wartości salda promieniowania były niższe od przeciętnych, jednak nie były to lata z najmniejszymi przychodami energii. W latach „suchych” przychód energii mierzony promieniowaniem netto był wszędzie wyższy od przeciętnego. Zazwyczaj lata te charakteryzowały się bardzo wysokimi wartościami dekadowymi Rn sięgającymi $156 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w 1982 r. w Gorzowie Wlkp. W Gorzowie oraz w Łodzi w roku „suchym” przez cztery dekady utrzymywały się wartości Rn wyższe od $140 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. W pozostałych rejonach nie zaobserwowano podobnych zależności. We Wrocławiu jedna dekada w roku „suchym” 1992 charakteryzowała się promieniowaniem netto wynoszącym $143 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a w Bydgoszczy najwyższy dekadowy przychód energii do powierzchni w roku „suchym” wynosił $125 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Wartości strumienia ciepła utajonego wykazują podobne do promieniowania netto zmiany wielkości w okresie wegetacji dla wszystkich stacji. Najwięcej energii było przeznaczane na parowanie w Łodzi, gdzie średnie dekadowe wartości tego strumienia dochodziły do $107 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ i dla prawie wszystkich dekad były wyższe od odpowiednich dla pozostałych stacji. Parowanie pochłaniało największą część energii (średnio 64%) dostarczonej do powierzchni czynnej. Dla łąnów pszenicy największa część energii jest przeznaczana na parowanie w lipcu (średnio od 82% Rn w Gorzowie Wlkp. do 85% Rn we Wrocławiu). W sierpniu we wszystkich badanych rejonach średnie udziały strumienia ciepła utajonego w promieniowaniu netto są niższe od 50%, co oznacza, że ogrzewanie atmosfery pochłania większą część energii niż parowanie. W latach „mokrych” w każdej badanej stacji z wyjątkiem Wrocławia wystąpiła przynajmniej jedna dekada, w której ponad 50% Rn zostało wykorzystane na parowanie. W latach „suchych” we wszystkich badanych rejonach parowanie w sierpniu pochłaniało mniej niż połowę energii dostarczonej do powierzchni czynnej. W latach „suchych” udział LE w promieniowaniu netto w sierpniu spadał nawet do 38% Rn w pierwszej dekadzie sierpnia 1992 r. w Łodzi.

Średnie dekadowe wartości strumienia ciepła jawnego wskazują na dwa okresy wyższych wartości: w drugiej dekadzie maja wynoszące 32 lub $33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ oraz zdecy-

dowanie wyższe w pierwszej dekadzie sierpnia wynoszące od $58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ we Wrocławiu do $63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ w Łodzi. Pomiędzy nimi występują mniejsze wartości. Strumień ciepła przeznaczonego na ogrzewanie atmosfery pochłania przeciętnie 25–27% R_n na początku kwietnia do 31–32% R_n w pierwszej dekadzie maja. Następnie udziały te spadają do kilkunastu procent, by w sierpniu znów wzrosnąć do 54–55% R_n . W latach „suchych” ogrzewanie atmosfery pochłania większą część energii (do 62% R_n w pierwszej dekadzie sierpnia 1992 roku w Łodzi, 61% R_n we Wrocławiu, 60% R_n w Gorzowie Wlkp. oraz 59% R_n w Bydgoszczy) niż w latach „mokrych” (do 61% R_n we Wrocławiu, 55% R_n w Bydgoszczy, 52% R_n w Łodzi oraz 51% R_n w Gorzowie Wlkp.).

Na podstawie badań regresji liniowej zmian w strukturze bilansu cieplnego w badanych rejonach stwierdzono, że udziały strumienia ciepła jawnego rosną kosztem ciepła utajonego.

7. WNIOSKI

1. W badanych rejonach (z wyjątkiem Gorzowa Wielkopolskiego) zaobserwowano wzrost udziałów strumienia ciepła przeznaczanego na ogrzewanie atmosfery w saldzie promieniowania i jednoczesny spadek udziałów ciepła przeznaczanego na parowanie. Wzrost wartości współczynnika Bowena świadczy o tym, że rośnie ilość ciepła przeznaczanego na ogrzewanie atmosfery, co może mieć konsekwencje we wzroście temperatury powietrza.

2. W rejonach Łodzi i Gorzowa Wielkopolskiego stwierdzono większą ilość energii dostarczonej do powierzchni czynnej niż w rejonach Wrocławia i Bydgoszczy. Zaobserwowano, że w latach „suchych” do powierzchni czynnej było dostarczane więcej energii niż w latach „mokrych”.

3. We wszystkich badanych stacjach pomiarowych odnotowano malejące średnie sumy opadów oraz rosnącą średnią temperaturę w okresie wegetacji pszenicy jarej.

4. W rejonie Wrocławia i Gorzowa Wielkopolskiego zaobserwowano tendencje wzrostowe ewapotranspiracji wskaźnikowej. W rejonie Bydgoszczy i Łodzi sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej z okresu wegetacji pszenicy jarej wykazały słabe tendencje malejące. Najwyższa ewapotranspiracja wskaźnikowa (z wyjątkiem Wrocławia) występowała w lipcu, a najniższa w kwietniu.

5. W rejonach Łodzi i Gorzowa Wielkopolskiego odnotowano większe deficyty opadów, mierzone klimatycznym bilansem wodnym, niż w rejonach Wrocławia i Bydgoszczy.

6. Dekady o wysokich opadach charakteryzują się niskimi wartościami ewapotranspiracji, a dekady o niskich opadach cechują wysokie wartości ewapotranspiracji.

7. Najbardziej zróżnicowane wartości z rozpatrywanych elementów opisu stosunków wodnych osiągał klimatyczny bilans wodny.

8. Największe niedobory wody (z wyjątkiem Gorzowa Wielkopolskiego) występowały w maju lub czerwcu, a najmniejsze w kwietniu.

9. W czerwcu i lipcu struktura bilansu cieplnego jest ewaporacyjna lub ewaporacyjno-konwekcyjna, a w sierpniu silnie lub skrajnie konwekcyjna.

8. PIŚMIENNICTWO

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper nr 56.
- Bac S., Rojek M., 1977. Metodyka oceny stosunków wodnych obszarów rolniczych na podstawie danych klimatycznych, Zesz. Nauk ART Olszt. Nr 21: 13–24.
- Bac S., Rojek M., 1982. Klimatyczne bilanse wodne w Polsce [w:] Bac S. (red.) Agrometeorologiczne podstawy melioracji wodnych w Polsce. PWRiL, Warszawa.
- Bubnowska J., Gašiorek E., Łabędzki L., Musiał E., 2005. Struktura bilansu cieplnego łąnów w ekstremalnych warunkach opadowych na tle wielolecia, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, t. 5, z. 2 (15), 31–52.
- Bubnowska J., Gašiorek E., Łabędzki L., Musiał E., Rojek M.S., 2005. Bilans cieplny lasu iglastego w latach o ekstremalnych opadach i jego wieloletnie zmiany w rejonie Bydgoszczy i Wrocławia, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, t. 5, z. specj. (14), 69–82.
- Businger J.A., Miyake M., Dayer A.J., Bradley E.F., 1967. On the direct determination of ten turbulent heat flux near the ground, J. Appl. Meteor., 6: 127–143.
- Doroszewski A., Górski T., 1995. Prosty wskaźnik ewapotranspiracji potencjalnej. Roczn. AR w Pozn. 271, 3–8.
- Eulenstein F., Leśny J., Chojnicki B.H., Kędziora A., Olejnik J., 2005. Analysis of the interrelation between the heat balance structure, type of plant cover and weather conditions, Internat. Agroph. 19(2): 125–130.
- Feddes R.A., Lenselink K.J., 1994. Evapotranspiration, [w:] Drainage principles and applications pod red. H.P. Ritzema, Wageningen: ILRI Publications 16, 145–173.
- Fritschen L.J., Simpson J., 1989. Surface energy and radiation balance system: general description and improvements, J. Appl. Meteor. 28: 680–689.
- Holtslag A.A.M. and Van Ulden A.P., 1983. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data, J. Appl. Meteor., 22, 517–29.
- Imark S., Haman D., 2003. Evapotranspiration: Potential or Reference?, Univ. of Florida IFAS Extension.
- Kasperska-Wołowicz W., Łabędzki L., 2004. Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, t. 4, z. 2a(11), 123–136.
- Kędziora A., 1999. Podstawy Agrometeorologii, PWRiL, Poznań.
- Kędziora A., Kapuściński J., Olejnik J., Mroczko J., Tuchołka S., Leśny J., 1994. Geograficzna zmienność struktury bilansu cieplnego, Roczn. AR Pozn. 257, Melior. Inż. Środ. 13, 175–194.

- Kędziora A., Olejnik J., Kapuściński J., 1989. Impact of landscape structure on heat and water balance, *Ecol. Intern. Bull.* 17, 1–17.
- Kędziora A., Olejnik J., Kapuściński J., Mroczko J., 1992. Obliczanie obszarowej struktury bilansu cieplnego i wodnego na przykładzie zlewni Wrześnicy, [w:] *Wybrane problemy ekologii krajobrazu. Mater. Konf. ZBRiL, Pozn.*, 40–60.
- Kim J., Verma S., 1990. Components of surface energy balance in a temperate Grassland ecosystem, *BLM* 51: 401–417.
- Kimura R., Liu Y., Tokayama N., Zhang X., Kamichika M., Natsuoka N., 2005. Heat and water balances of the bare soil surface and the potential distribution of vegetation in the Loess Plateau, China, *Jour. Of Arid Environ.* 63(2): 439–457.
- Kovacs G., 1988. Comparison of models interrelating multiannual precipitation and actual areal evapotranspiration, *J. Hydrol.* 66: 1–76.
- Lee X., Black T.A., 1993. Atmospheric turbulence within and above a Douglas-fir stand. Part II: Eddy fluxes of sensible heat and water vapour, *Boundary-Layer Meteorol.* 64: 369–389.
- Leśny J., 1998. Analiza wpływu pokrywy roślinnej na strukturę bilansu cieplnego powierzchni czynnej, Poznań AR, pr. dokt. maszyn.
- Leśny J., Chojnicki B.H., Olejnik J., 2002. Ocena bilansu cieplnego wybranych powierzchni czynnych metodą Bowena, *Roczn. AR Pozn.* 342, *Melior. Inż. Środ.* 23, 349–354.
- Leśny J., Olejnik J., Chojnicki B.H., Eulenstein F., 2001. Automatical measurement system for heat balance structure investigations from calibration to fields study, *Acta Agrophysica* 2001 vol. 57, 57–68.
- Lorenc H., 2000. Studia nad 220-letnią (1779–1998) serią temperatury powietrza w Warszawie oraz ocena jej wiekowych tendencji, *Mat. Bad. IMGW* nr 31.
- Łabędzki L., 1997. Potrzeby nawadniania użytków zielonych – uwarunkowania przyrodnicze i prognozowanie, *Wyd. IMUZ.*
- Łabędzki L., 1999. Przydatność wzoru Penmana-Moneitha do obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej i rzeczywistej użytków zielonych, *Wiad. IMGW*, t. XX, z. 2, 89–101.
- Łabędzki L., 2000. Wpływ poziomu wody gruntowej i wilgotności gleby torfowomurszowej na ewapotranspirację łąki dwukośnej w dolinie Noteci, *Wiad. IMUZ*, t. XX z. 3, 125–140.
- Łabędzki L., Szajda J., Szuniewicz J., 1996. Ewapotranspiracja upraw rolniczych – terminologia, definicje, metody obliczania. *Przegląd stanu wiedzy, IMUZ Mat. Inf.* nr 33.
- Łabędzki L., 2006. Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji, *Woda Środowisko Obszary Wiejskie, Rozpr. Nauk i Monogr.* nr 17.
- Molga M., 1955. Bilans cieplny powierzchni Ziemi. *Przegl. Meteorol. Hydrolog.* 8, 1: 75–90.
- Molga M., 1972. *Meteorologia rolnicza.* PWRiL, Warszawa.
- Morton F.J., 1983. Operational estimates of evapotranspiration and their significance to the science and practice on hydrology, *J. Hydrology*, 66 (11/4), 1–76.
- Musiak E., 2001. Modelowanie procesu ewapotranspiracji rzeczywistej i prognozowanie jego tendencji, *Zesz. Nauk. AR Wroc.* nr 412.

- Musiał E., Gąsiorek E., Rojek M.S., 2004. Zmienność temperatury powietrza w obserwatorium Wrocław-Swojecz w latach 1964–2001, *Acta Agroph.* Nr 105, vol. 3(2), 333–342.
- Olejnik J., 1986. Wpływ szaty roślinnej na turbulencyjne przenoszenie ciepła i pary wodnej w przygrunтовой warstwie atmosfery, Biblioteka PAN, Warszawa.
- Olejnik J., 1988. Present and future estimates of evapotranspiration and runoff for Europe, HASA Working Paper, WP-88-037, 15 pp.
- Olejnik J., 1988. The empirical method of estimating mean daily and mean ten-day values of latent and sensible-heat near the ground, *J. Appl. Meteorol.* 12, 1358–1369.
- Olejnik J., 1989. Pomiary wymiany ciepła i pary wodnej w środowisku naturalnym przy zastosowaniu psychometrów kwarcowych, *Rocz. AR Pozn.* 2001, 8: 75–82.
- Olejnik J., 1994. Projekt kompleksowego monitoringu środowiska leśnego „BOREAS”, *Przegl. Geofiz.*, 39, 4: 375–383.
- Olejnik J., 1994. Metody oceny składowych bilansu cieplnego w badaniach nad środowiskiem, *Rocz. AR Pozn.* 268, 15: 229–243.
- Olejnik J., 1996. Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych, *Rozpr. Nauk. AR Pozn. Zesz.*, 268.
- 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, 601–617.
- Olejnik J., Leśny J., Eulenstein F., Kędziora A., 1999. Ekstremalne wartości składników bilansu cieplnego agroekosystemów w różnych warunkach klimatycznych, *Folia Univ. Agric. Stetin.* 202 *Agricult.* (79), 179–184.
- Omstedt A., Nohr C., 2003. Calculating the water and heat balances of the Baltic Sea using ocean modelling and available meteorological, hydrological and ocean data, vol. 56.
- Paszyński J., 1966. Die Strahlungsbilanz Polens. *Z. Meteorol.* 17, 9–12: 321–327.
- Paszyński J., 1979. Energy exchange in the plant environment, *ZPPNR Z2:* 81–89.
- Paszyński J., Niedźwiedz T., 1991. *Klimat (Geografia Polski – środowisko przyrodnicze)*, PWN, Warszawa, 296–355.
- Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, London: *Proc. Royal Soc.* Vol. 193: 120–146.
- Rojecki A., 1958. *Tablice psychometryczne*, PIMM.
- Rojek M., 1987. Rozkład czasowy i przestrzenny klimatycznych i rolniczo-klimatycznych bilansów wodnych na terenie Polski, *Zesz. Nauk. AR Wrocław, Rozpr.*, Nr 62.
- Rojek M., 1994. Rozkład przestrzenny klimatycznych bilansów wodnych na terenie Polski w okresie 1951–1990, *Zesz. Nauk. AR Wroc.*, *Inż. Środ.* VI, 243, 9–21.
- Rojek M., Wiercioch T., 1995. Zmienność czasowa i przestrzenna parowania wskaźnikowego, ewapotranspiracji aktualnej i niedoborów opadowych w Polsce nizinnej w okresie 1951–1990 *Zesz. Nauk. AR Wroc.* Nr 238, *Monogr.* VI.
- Rosenberg N.J., 1974. *Microclimate: The Biological Environment*, Wiley, Chichester, pp. 315.

- Ryszkowski L., Kędziora A., 1987. Impact of agricultural landscape structure on energy flow and water cycling, *Landscape Ecology*, 1(2), 85–94.
- Ryszkowski L., Kędziora A., Olejnik J., 1991. Potential effects of climate and land use changes on the water balance structure in Poland, [w:] *Land use changes in Europe*, Red. F.M. Brouwer, A.J. Thomas, M.J. Chawick, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 253–274.
- Ryszkowski L., Kędziora A., 1993. Rolnictwo, a efekt szklarniowy, *Kosmos* 42, 123–149.
- Shuttleworth W.J., Wallace J.S., 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory, *Quart. J.R. Met. Soc.* 111, p. 839–895.
- Taylor S.A., 1972. *Physical edaphology*, Acad. Press, San Francisco, ss.549.
- Trepińska J., 1997. *Wahania klimatu w Krakowie (1972-1995)*, Kraków Ist. Geogr. UJ.

CLIMATIC CHANGES OF WATER AND HEAT BALANCE OF SPRING WHEAT IN SELECTED AREAS OF POLAND

S u m m a r y

The research contains analysis of the components of the heat balance and the climatic water balance (CBW) in the vegetation period of spring wheat (IV–VIII) estimated on the basis of data from four meteorological stations of : Bydgoszcz (1946–2004), Gorzów Wielkopolski (1975–1990), Wrocław-Swojec (1946–2000) and Łódź (1954–1995). The analysis of changes of the climatic water balance, defined as the difference between the precipitation and the reference evapotranspiration estimated with the Penman's method, indicates the progressing deficit of water in the spring wheat's vegetation period throughout the examined decades. On the basis of the long-term proceedings of the heat balance's component values: net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, soil heat flux, it was indicated that the structure of the balance is altering towards the direction of consumption of increasing amounts of energy provided to the active surface for warming up the atmosphere (sensible heat flux) at the cost of energy purposed for evaporation (latent heat flux). The component values of the heat balance and the climatic water balance in the periods of vegetation (IV–VIII), with the highest and the lowest levels of precipitation of the considered years from every station, were meticulously analyzed in the research. In the "wet" periods precipitation predominated the reference evapotranspiration and gave positive values of the climatic water balance, in the "dry" years evaporation predominated precipitation which resulted with negative values of CBW. The heat balance's structure is presented with Bowen's coefficient which is the quotient of sensible and latent heat flux ($\beta = H/LE$). Since April till July the structure of the heat balance had evapotranspirational or evapotranspirational-convective nature, in August it modulated into strongly or extremely convective.

Key words: heat balance, climatic water balance, climate changes

ZMIANY KLIMATYCZNEGO BILANSU WODNEGO I BILANSU CIEPLNEGO PSZENICY JAREJ

Streszczenie

Praca zawiera analizę składowych bilansu cieplnego oraz klimatycznego bilansu wodnego (KBW) w okresie wegetacji pszenicy jarej (IV–VIII), wyznaczonych na podstawie danych pochodzących z czterech stacji meteorologicznych: Bydgoszczy (1946–2004), Gorzowa Wielkopolskiego (1975–1990), Wrocławia-Swojca (1964–2000) oraz Łodzi (1954–1995). Analiza zmienności klimatycznego bilansu wodnego, zdefiniowanego jako różnica między opadem a ewapotranspiracją wskaźnikową wyznaczoną metodą Penmanna, na przestrzeni badanych wieloleci wskazuje na pogłębiające się deficyty wody w okresie wegetacji pszenicy jarej. Na podstawie wieloletnich przebiegów wartości składowych bilansu cieplnego: promieniowania netto, strumienia ciepła jawnego, utajonego i glebowego stwierdzono, że struktura bilansu ulega zmianie w kierunku zużycia coraz większych ilości energii dostarczanej do powierzchni czynnej na ogrzewanie atmosfery (strumień ciepła jawnego) kosztem energii przeznaczanej na parowanie (strumień ciepła utajonego). W pracy przeanalizowano szczegółowo składowe bilansu cieplnego oraz klimatycznego bilansu wodnego w okresach wegetacji (IV–VIII) o największych i najmniejszych opadach z rozważanych wieloleci na każdej ze stacji. W okresach „mokrych” opad przeważał nad ewapotranspiracją wskaźnikową, dając dodatnie wartości klimatycznego bilansu wodnego, a w latach „suchych” parowanie przewyższało opady, skutkując ujemnymi wartościami KBW. Strukturę bilansu cieplnego wyrażano współczynnikiem Bowena, będącym ilorazem strumienia ciepła jawnego i utajonego ($\beta = H/LE$). Od kwietnia do lipca struktura bilansu cieplnego miała charakter ewaporacyjny lub ewaporacyjno-konwekcyjny, w sierpniu przechodził w silnie lub skrajnie konwekcyjny.

Słowa kluczowe: bilans cieplny, klimatyczny bilans wodny, zmiany klimatu