

PROMIENIOWANIE SŁONECZNE CAŁKOWITE A BILANS PROMIENIOWANIA NA POLU PSZENICY OZIMEJ

J. Kossowski

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego, Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

S t r e s z c z e n i e. Określenie związku pomiędzy bilansem promieniowania nad daną powierzchnią a dopływającym do niej promieniowaniem słonecznym stwarza możliwość szacowania wartości bilansu promieniowania w oparciu o bardziej dostępne dane dotyczące promieniowania słonecznego. Pod tym - między innymi - kątem zostały opracowane wyniki pomiarów przeprowadzonych na polu z uprawą pszenicy ozimej w Felinie koło Lublina. W pracy wykorzystano materiały obserwacyjne zebrane w trakcie okresu wegetacji wiosenno- letniej (w dwóch sezonach) oraz podczas wschodów pszenicy (w jednym sezonie). Do szczegółowej analizy wybrano po 10 dni z danego sezonu, przy czym kryterium wyboru stanowił brak opadów atmosferycznych oraz uzyskanie dużego zróżnicowania warunków insolacyjnych wśród tych dni (przy pogodzie pochmurnej, ze zmiennym i umiarkowanym zachmurzeniem oraz pogodzie bezchmurnej). Wyznaczono równania zależności bilansu promieniowania od całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych dniach oraz dla 10 dni łącznie w danym sezonie (w oparciu o wartości półgodzinne), a także określono stosunek sum tych strumieni energii promienistej w okresie dziennym (od wschodu do zachodu słońca), w okresie występowania dodatnich (skierowanych ku powierzchni czynnej) wartości bilansu promieniowania oraz w czasie trzech godzin okołopołudniowych. Stwierdzono, że wielkość stosunku wartości bilansu promieniowania do całkowitego promieniowania słonecznego zależała od rozpatrywanego przedziału czasowego podczas dnia oraz wykazywała duże (sięgające 20-30 %) zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi dniami w danym sezonie. Także wartości współczynników w równaniach regresji liniowej wyznaczonych dla wybranych dni różniły się znacznie, bardziej w wyniku zróżnicowania warunków pogodowych niż zmian charakteru powierzchni czynnej pola pszenicy.

S ł o w a k l u c z o w e: bilans promieniowania, pszenica ozima, struktura bilansu promieniowania

WSTĘP

Wartości bilansu promieniowania (R_n), niezależnie od przedziału czasu dla jakiego są rozpatrywane, stanowią o ilości energii potencjalnie dostępnej i rozchodowanej w procesach parowania i wymiany ciepła zachodzących na powierzchni czynnej. Opisuje to równanie bilansu cieplnego, w postaci:

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

w którym LE oznacza ilość ciepła zużytej na parowanie (ewapotranspirację), H i G - odpowiednio, wymianę ciepła między powierzchnią czynną a atmosferą i jej podłożem

(glebą wraz z porastającą ją roślinnością). Natomiast o wartości bilansu promieniowania w danym czasie decyduje różnica natężenia strumieni promieniowania skierowanych do i od powierzchni czynnej:

$$Rn = Rk + Rd = (1 - \alpha) Qs + Rd \quad (2)$$

gdzie: Rk - bilans promieniowania w zakresie krótkofalowym, Rd - bilans promieniowania długofalowego, Qs - promieniowanie słoneczne całkowite (bezpośrednie i rozproszone łącznie), α - albedo powierzchni czynnej (stosunek promieniowania słonecznego odbitego od powierzchni do padającego na nią). W okresie dziennym, przy występowaniu ujemnych z reguły wartości salda promieniowania długofalowego, decydujący wpływ na wartości Rn ma ilość energii docierająca do danej powierzchni czynnej w postaci krótkofalowego promieniowania słonecznego (Qs).

Generalnie, natężenie promieniowania słonecznego zależy od położenia miejsca obserwacji (zwłaszcza szerokości geograficznej), pory roku i dnia oraz przezroczystości atmosfery i zachmurzenia nieba. Wartości bilansu promieniowania (Rn) zależą ponadto od albeda powierzchni czynnej, jej temperatury i współczynnika emisyjności oraz od zawartości pary wodnej w powietrzu i jego temperatury. Dlatego też - obok warunków atmosferycznych - rodzaj powierzchni czynnej ma istotne znaczenie w kształtowaniu się struktury bilansu promieniowania, jej zróżnicowaniu w przestrzeni i czasie.

Związek między promieniowaniem słonecznym a bilansem promieniowania różnych powierzchni naturalnych i rolniczych charakteryzowano poprzez wskaźnik liczbowy (stosunek wartości Rn do Qs), jak również zależność funkcyjną (równanie regresji liniowej $Rn = a Qs - b$, lub $Rn = a (1 - \alpha) Qs - b$). Wspomniany wskaźnik określano głównie w badaniach agroklimatycznych, przy analizie i porównywaniu wpływu rodzaju i stopnia rozwoju pokrywy roślinnej na strukturę bilansu radiacyjnego pól uprawnych w różnych warunkach glebowo-klimatycznych [2,10,15,16]. Pomijając rozbieżności wyników uzyskiwane w poszczególnych badaniach, wykazane zostały pewne ogólne prawidłowości odnośnie stosunku Rn/Qs . Stwierdzono, że jego wartości są niższe w przypadku gołej niż pokrytej roślinnością gleby, zmieniają się wraz ze wzrostem stopnia pokrycia gleby przez rośliny i z kolejnymi fazami rozwoju roślin uprawnych, a przy tym zmniejszają się podczas znacznego spadku wilgotności gleby powodującego stres wodny (wiednięcie) roślin.

Przy określaniu zależności $Rn = f(Qs)$ uzyskiwano zawsze wysokie współczynniki korelacji, niezależnie od rozpatrywanego obiektu badań. Różnice wartości współczynników a i b w równaniach (zwłaszcza współczynnika kierunkowego) otrzymywane dla odmiennych powierzchni czynnych wiązano przede wszystkim ze zróżnicowaniem ich albedo (np. mniejszym dla gleby bez roślin niż zielonego łąnu). Jednocześnie odnotowano i dyskutowano wyraźnie zauważalny wpływ warunków atmosferycznych (głównie zachmurzenia) na ostateczny kształt tej zależności (między innymi większe wartości współczynnika "a" podczas pogody bezchmurnej) [1,3-6,8,12, 16]. Warto dodać, że zaletą tego podejścia do zagadnienia jest możliwość szacowania wartości Rn w przebiegu dziennym i sezonowym w oparciu o łatwiej mierzalne,

rejestrowane na niektórych stacjach meteorologicznych dane Q_s , a przy wykorzystaniu związku sum dobowych Q_s z usłonecznieniem - również na podstawie jeszcze powszechniejszych pomiarów heliograficznych i nefologicznych [11,13,14].

Celem niniejszej pracy jest określenie i porównanie związku między wartościami promieniowania słonecznego całkowitego (Q_s) a bilansu promieniowania (Rn) na polu pszenicy ozimej podczas wschodów i w późniejszych fazach jej rozwoju, rozpatrując przy tym zarówno zależność funkcyjną natężenia, jak i stosunek sum Rn i Q_s z różnych okresów w ciągu dnia.

OBIEKT I METODYKA BADAŃ

W pracy wykorzystano część wyników uzyskanych podczas trzyletnich badań prowadzonych na polach doświadczalnych lubelskiej Akademii Rolniczej w Felinie k/Lublina przez Instytut Agrofizyki PAN, przy współpracy z innymi jednostkami naukowymi (w tym z Zakładem Meteorologii i Klimatologii SGGW oraz Zakładem Klimatologii IGiPZ PAN w Warszawie). Promieniowanie słoneczne całkowite mierzono przy użyciu solarymetru firmy Kipp i Zonen umieszczonego na wysokości 2,5 m na terenie Stacji Agrometeorologicznej usytuowanej na skraju kompleksu tzw. pól ustalonych. Na polach tych, o wymiarach 30x40 m każde, prowadzona była rotacyjnie uprawa 6 różnych roślin, w tym pszenicy ozimej. Bilansomierze (typ CN1 produkcji australijskiej firmy Middleton) instalowano pośrodku danego pola na wysokości 1,5 m nad łanem roślin (utrzymując ten dystans w miarę ich wzrostu). Rejestrację przebiegu dobowego bilansu promieniowania prowadzono z krokiem czasowym 20 lub 40 s (zależnie od sezonu), a rejestrację promieniowania słonecznego z krokiem 40 bądź 120 s.

Z obszernego - lecz zawierającego pewne luki - materiału obserwacyjnego zebranego w trakcie okresu wegetacji wiosenno-letniej (w 2 sezonach) oraz podczas wschodów pszenicy (1 sezon), wybrano do analizy 10 dni w danym sezonie. Podstawowe kryterium ich wyboru stanowił brak opadów atmosferycznych, a w dalszej kolejności - możliwie duże zróżnicowanie usłonecznienia i zachmurzenia, a zatem i dopływu promieniowania słonecznego pomiędzy poszczególnymi dniami. Okres wschodów pszenicy reprezentują dni pomiędzy 22.X a 12.XI.1982 roku (siew w dniu 27.IX), przy czym średnia wysokość roślin w ostatnim z rozpatrywanych dni wynosiła 7 cm, a stopień pokrycia gleby około 25%. Późniejszych faz rozwojowych pszenicy dotyczyły wybrane dni między 17.V a 18.VII.1978 oraz 5.VI a 5.VII.1979. W sezonie 1978 obejmowały one końcowy okres strzelania w źdźbło aż do początku dojrzałości woskowej (przy wysokości roślin od 37 cm w pierwszym z wybranych dni do 103 cm w ostatnim), a w 1979 roku - fazę kłoszenia do początku dojrzałości młeczej (wysokość łanu wzrastała od 73 do 93 cm). Warto dodać, że technologia uprawy i odmiana pszenicy ozimej była taka sama, jednakże średnia liczba roślin na 1 m² pola w roku 1979 (480) okazała się mniejsza niż w roku 1978 (559).

Materiał wyjściowy do obliczeń i analiz stanowiły średnie z okresów 1/2 - godzinnych wartości promieniowania słonecznego i bilansu promieniowania w danym dniu (w $W m^{-2}$). W oparciu o nie wyznaczono równania zależności Rn od Qs w poszczególnych dniach oraz w rozpatrywanych 10 dniach łącznie w danym sezonie, określono sumy tych strumieni energii (w $J cm^{-2}$) podczas okresu dziennego (od wschodu do zachodu słońca), okresu z dodatnimi wartościami Rn i w innych przedziałach czasowych w ciągu doby, a następnie stosunek jednych do drugich (sRn/sQs). Należy zaznaczyć, że w celu ułatwienia obliczeń przyjęto jednakową (średnią) długość okresu dziennego: 16 godzin dla wszystkich rozpatrywanych dni na przełomie wiosny i lata oraz 9,5 godz. dla dni jesiennych.

Dane dotyczące wybranych elementów meteorologicznych, przedstawione w Tabeli 1 dla scharakteryzowania warunków atmosferycznych podczas rozpatrywanych dni, uzyskane zostały za pomocą standardowych przyrządów i metod stosowanych na stacjach meteorologicznych. Odnoszą się one wyłącznie do okresu dziennego, gdyż stanowią średnią z pomiarów w 3 klimatologicznych terminach obserwacyjnych (w tym także średnia temperatura powietrza). W Tabeli 1 podano również dane o wilgotności gleby określanej metodą grawimetryczną.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Naturalna okresowość zmian wartości bilansu promieniowania w przebiegu dobowym, wynikająca z dopływu promieniowania słonecznego podczas dnia i efektywnego promieniowania powierzchni czynnej w nocy, zaznacza się najwyraźniej przy pogodzie bezchmurnej. Można wówczas najlepiej zaobserwować momenty przejścia wartości bilansu promieniowania z ujemnych na dodatnie (rano) i odwrotnie (wieczorem), jak też proporcje między długością okresu z wartościami dodatnimi i ujemnymi, związane przede wszystkim z zależną od pory roku długością dnia, ale i warunkami atmosferycznymi. Przedstawione dla ilustracji wykresy przebiegu dobowego bilansu promieniowania (Rn) na polu pszenicy ozimej na tle przebiegu całkowitego promieniowania słonecznego (Qs) w pogodnym dniu letnim i jesiennym (Rys. 1) pokazują równocześnie, że poranna zmiana znaku wartości Rn dokonuje się ze znacznym opóźnieniem w stosunku do momentu wschodu słońca (dopiero po osiągnięciu przez Qs pewnej, zróżnicowanej jednak z dnia na dzień) wartości, a wieczorem - znacznie przed zachodem słońca.

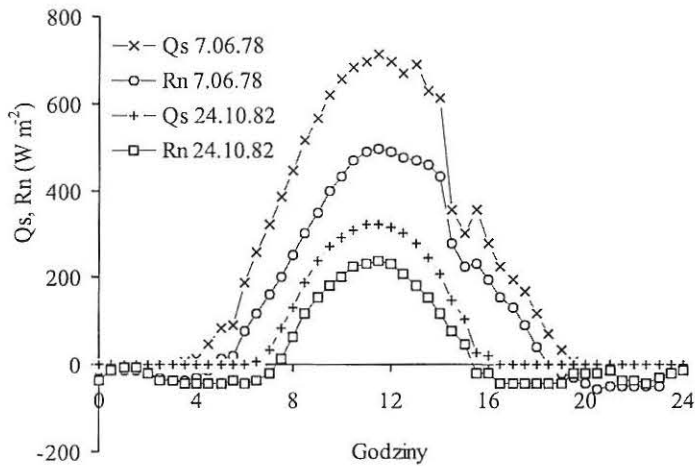
Krótszy okres występowania dodatnich wartości Rn w porównaniu do okresu z dopływem promieniowania słonecznego sprawia, iż przy określaniu stosunku wartości Rn/Qs jest możliwe i zasadne operowanie danymi obejmującymi tak okres dzienny (od wschodu do zachodu słońca), jak i okres występowania dodatnich Rn (oznaczanych dalej jako $Rn+$). Dokonana przy okazji obliczania sum $Rn+$ w poszczególnych dniach analiza czasu ich występowania wykazała, że na polu pszenicy w okresie wiosenno-letnim notowano je przeważnie podczas 12-13 godzin, a w wybranych dniach jesiennych na polu wschodzącej pszenicy w ciągu 7,5-8 godzin. Mając to na uwadze (a równocześnie dla

T a b e l a 1. Dane dotyczące warunków atmosferycznych w rozpatrywanych dniach badań (Ur - usłonecznienie rzeczywiste, N - śr. zachmurzenie w skali 0-10, T - śr. dzienna temperatura powietrza, Wp - śr. wilgotność względna powietrza, v - śr. prędkość wiatru) oraz wilgotności gleby w warstwie powierzchniowej (0-5 cm) na polu pszenicy ozimej (Wg)

T a b e l e 1. Some meteorological data and topsoil (0-5 cm) water content in winter wheat field noted during analysed days. Explanations: Ur - sunshine duration (hours), N - mean cloudiness (in 0-10 scale) and type of clouds, T - mean air temperature, Wp - mean air humidity, v - mean wind speed, Wg - topsoil water content

Data	Ur (godz.)	N - rodzaj chmur	T (°C)	Wp (%)	v (m s ⁻¹)	Wg (m ³ m ⁻³)
1978.05.17	8,8	7,0 - Ci,Cu	12,9	80	0,3	0,321
18	10,3	5,3 - Ci,Ac,Cu	13,8	73	0,7	0,314
19	8,2	3,7 - Ci,As,Ac,Cu	13,1	78	3,0	0,307
06.6	8,0	6,0 - Ci,Ac,Cu	20,4	64	1,0	0,131
7	12,3	3,3 - Cu	21,2	72	3,3	0,125
13	7,6	7,0 - Ci,Cu	11,5	80	6,0	0,241
14	1,9	9,0 - St,Sc,Cu	11,9	84	3,3	0,234
07.13	12,1	2,7 - Ci,Ac,Cu	18,9	72	3,7	0,203
16	1,2	8,7 - As,Ac,Cu,St	12,0	74	4,0	0,140
18	8,8	7,3 - Ci,Ac,Cu	14,3	77	1,7	0,180
1979.06.5	13,1	1,3 - Ci	19,3	56	2,3	0,109
6	13,4	0,3 - Ci,Cu	21,7	56	2,0	0,099
9	11,9	4,7 - Ci,Ac,Cu	18,3	54	2,3	0,081
11	13,2	2,7 - Ci,Cu	17,0	62	1,3	0,068
12	8,4	4,0 - Ci,As,Cu	21,3	59	1,0	0,064
25	9,7	3,3 - Ci,Cu,Cb	22,8	71	2,0	0,123
26	7,2	7,3 - Ci,Ac,Cu,Cb	21,3	80	1,0	0,104
29	0,9	9,3 - As,Ac,Cu	18,6	78	2,3	0,134
07.4	5,3	8,0 - Ci,Ac,Cu	16,5	68	1,7	0,215
5	7,1	5,7 - Ci,Ac,Cu,Sc	14,9	66	4,0	0,199
1982.10.22	6,6	1,7 - Ci,Ac	10,1	85	2,0	0,168
23	7,3	0,7 - Ac	13,2	68	4,0	0,160
24	7,2	2,3 - Ac	15,6	64	5,3	0,151
25	2,3	6,7 - Ci,Ac,Cu,St	9,2	89	1,3	0,141
11.3	0,4	9,0 - St,Sc	9,8	83	3,7	0,125
4	2,8	5,3 - Ci,Ac,Cu,St	6,3	86	2,7	0,122
9	0,3	7,0 - Ci,Ac,Sc	7,6	39	6,3	0,104
10	0,1	9,3 - As,Ac,Sc	9,5	57	3,7	0,102
11	4,1	1,7 - Ci,Ac	8,8	68	4,3	0,100
12	5,1	3,3 - St (mgła rano)	5,8	87	1,3	0,100

uproszczenia), przyjęto w niniejszej pracy stosować stałą dla rozpatrywanych dni długość okresu z $Rn+$ wynoszącą 12 godzin okołopołudniowych w dniach na przełomie wiosny i lata oraz 7,5 godziny w dniach jesiennych. Ze względu na małe wartości rano i wieczorem, sumy Rn z tych stałych 12- i 7,5- godzinnych okresów różniły się niewiele od rzeczywistych sum $Rn+$ (średnio o 1,4% dniach jesiennych 1982, a 1,2 i 2,1% w wybranych dniach letnich 1979 i 1978). Dla uzupełnienia obrazu relacji między



Rys. 1. Przebieg dobowy całkowitego promieniowania słonecznego (Q_s) i bilansu promieniowania (R_n) w pogodnym dniu letnim (7.VI.1978) i jesiennym (24.X.1982). Felin, pole pszenicy ozimej.

Fig. 1. Comparison of the daily course of total solar radiation (Q_s) and net radiation (R_n) during a clear day in summer (7 June 1978) and clear day in autumn (24 October 1982). Felin, a winter wheat field.

promieniowaniem słonecznym a bilansem promieniowania, dokonano obliczeń stosunku ich sum w trzech godzinach południowych, kiedy obserwowane są najwyższe w przebiegu dziennym wartości zarówno Q_s jak i R_n , a albedo powierzchni czynnej jest najmniejsze.

Jak wynika z danych zawartych w Tabeli 2, wartości liczbowe stosunku sR_n/sQ_s różniły się w zależności od zastosowanego w obliczeniach okresu. Jest to zrozumiałe, zważywszy na przebieg dzienny obu strumieni promieniowania oraz ich stosunku [9]. Najmniejsze wartości stosunku sR_n/sQ_s zanotowano przy rozpatrywaniu okresów dziennych (od wschodu do zachodu słońca), największe zaś w godzinach południowych, przy czym przyrost wartości stosunku określonego dla godzin południowych (w odniesieniu do stosunku z okresu dziennego) był rzędu 10% w przypadku dni wiosenno-letnich, a 15% w dniach jesiennych (średnio). Wartości stosunku obliczone na podstawie sum dobowych R_n i Q_s mieściły się - z natury rzeczy - pomiędzy określonymi dla okresu dziennego a okresu z dodatnimi wartościami R_n .

Dalsze spostrzeżenia nasuwające się przy analizie zawartych w Tabeli 2 danych, to: 1) mniejsze wartości stosunku podczas wschodów pszenicy (jesienią) niż latem, gdy stanowiła zwarty łan roślin; 2) - znaczne, sięgające 20-30% różnice stosunku sR_n/sQ_s pomiędzy poszczególnymi dniami. Pierwsze z powyższych spostrzeżeń znajduje uzasadnienie w zróżnicowanym charakterze powierzchni czynnej i jej albedo, natomiast drugie sugeruje wpływ warunków atmosferycznych na kształtowanie się stosunku R_n/Q_s .

Wpływ warunków atmosferycznych (w tym przede wszystkim zachmurzenia nieba) na przebieg dzienny i - w konsekwencji - sumy wartości zarówno R_n jak Q_s , był ewidentny. Wśród rozpatrywanych dni w każdym z sezonów, największe sumy R_n zanotowano przy

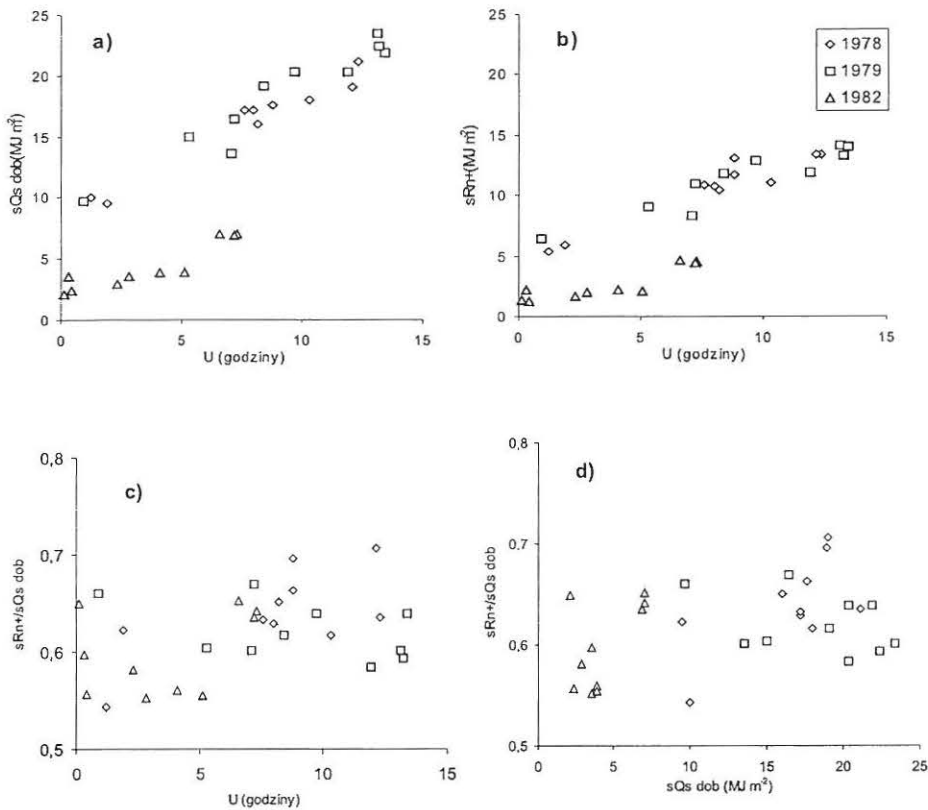
T a b e l a 2. Średnie oraz największe i najmniejsze wartości stosunku sRn/sQs obliczonego dla okresu od wschodu do zachodu słońca (a), okresu o dodatnich wartościach Rn (b), dla 3 godzin okołopołudniowych (c) i jako stosunek sumy wartości dodatnich Rn do sumy dobowej Qs (d) w rozpatrywanych dniach danego sezonu na polu pszenicy, w zestawieniu z sumami dobowymi Qs i dodatnich wartości Rn

T a b l e 2. Mean, highest and lowest values of the ratio of net to solar radiation sums (sRn/sQs) calculated on the base data from sunrise to sunset (a), for period with positive net radiation values (b), for three midday hours (c) and as ratio sum of positive values Rn to daily sum of solar radiation (d) in ten analysed days during a given season. In addition, the daily sums of solar radiation (Qs) and sums of positive values of net radiation ($Rn+$) are presented in the same way

Sezon	Wartość	Suma Qs ($J\ cm^{-2}$)	Suma $Rn+$ ($J\ cm^{-2}$)	sRn/sQs			
				a	b	c	d
1982	śr. 10 dni	432	263	0,572	0,615	0,662	0,598
	największa	698	455	0,645	0,678	0,714	0,652
	najmniejsza	212	134	0,472	0,555	0,585	0,552
1978	śr. 10 dni	1644	1062	0,629	0,659	0,689	0,640
	największa	2107	1343	0,699	0,726	0,742	0,706
	najmniejsza	952	542	0,531	0,568	0,627	0,543
1979	śr. 10 dni	1820	1126	0,609	0,637	0,674	0,621
	największa	2344	1408	0,655	0,675	0,723	0,670
	najmniejsza	971	642	0,583	0,602	0,603	0,584

występowaniu pogody bezchmurnej lub o niewielkim zachmurzeniu, warunkującej nieprzerwany dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego (przy usłonecznieniu zbliżonym do możliwego). Przeciwnastawne warunki pogodowe (zachmurzenie całkowite lub duże chmurami piętra niskiego, usłonecznienie bliskie zera) determinowały występowanie najniższych sum tak Qs , jak i $Rn+$. O ile jednak wpływ warunków atmosferycznych na wielkości Qs i Rn w ciągu dnia jest stosunkowo łatwy do wykazania (przykładem liniowa zależność od usłonecznienia), to w przypadku stosunku Rn/Qs nie jest on tak jednoznaczny i prosty do określenia. Tak też okazało się przy próbie analizy jego zależności od usłonecznienia rzeczywistego (Rys. 2). Nawet przy tak niewielkiej liczbie uwzględnianych dni, zależność sum dobowych Qs i $Rn+$ od usłonecznienia zaznaczyła się wyraźnie, a współczynniki korelacji wynosiły ponad 0,9 dla wszystkich czterech pokazanych na Rys. 2a i b (oddzielnie dla dni letnich i jesiennych) zależności. Natomiast wyznaczając równania regresji $sRn+/sQs_{dob}$ od usłonecznienia (Rys. 2c), gdy rozpatrywano dni jesienne współczynnik korelacji wynosił 0,349, dni letnie 0,146, a wszystkie dni razem 0,357. Warto dodać, że podobną wielkość współczynnika korelacji ($r = 0,379$) uzyskano określając związek stosunku $sRn+/sQs_{dob}$ z sumą dobową Qs (Rys. 2d) oraz związek wartości stosunku sRn/sQs z sumą Qs podczas 3 godzin okołopołudniowych ($r = 0,348$).

Wpływ warunków pogodowych był zauważalny również przy rozpatrywaniu zależności między wartościami bilansu promieniowania a całkowitego promieniowania słonecznego podczas poszczególnych dni. Jak pokazują wykresy na Rys. 3, oprócz zakresu wartości chwilowych, w dniach pochmurnych o wiele mniejszego niż w dniach

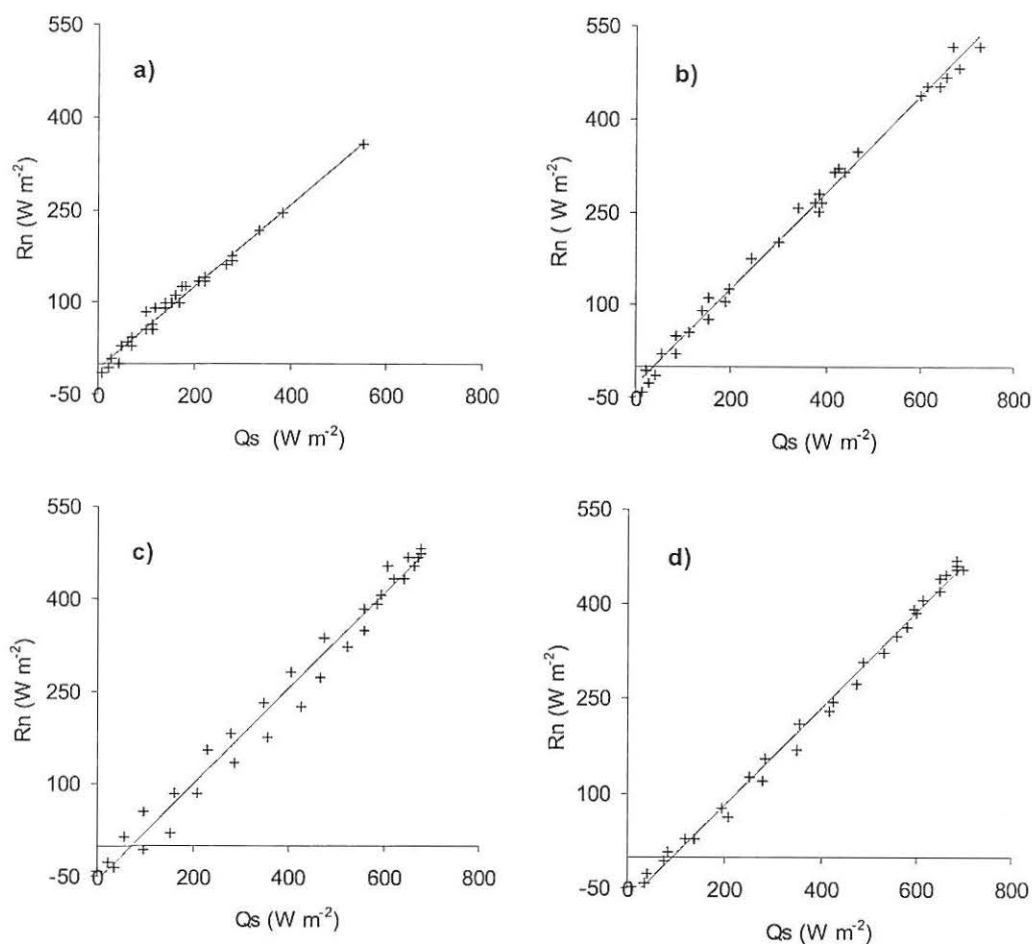


Rys. 2. Wykresy zależności: a) - pomiędzy sumą dobową całkowitego promieniowania słonecznego (sQs_{dob}) a usłonecznieniem rzeczywistym (U), b) - sumą dodatnich wartości bilansu promieniowania ($sRn+$) a usłonecznieniem (uzyskane na podstawie danych z 20 rozpatrywanych dni w okresie wegetacji wiosenno-letniej i - oddzielnie - dla 10 dni z okresu wschodów pszenicy ozimej); c) - pomiędzy wartością stosunku $sRn+/sQs_{dob}$ a usłonecznieniem i d) - sumą dobową promieniowania słonecznego we wszystkich 30 rozpatrywanych dniach. Objaśnienie: odrębną sygnaturą oznaczono dane z poszczególnych sezonów.

Fig. 2. Relations: a) - daily sum of total solar radiation (sQs_{dob}) versus sunshine duration (U), b) - sums of positive values of net radiation ($sRn+$) versus sunshine duration (separately plotted for days within spring-summer period and for days in autumn), c) - between the ratio $sRn+/sQs_{dob}$ values and sunshine duration, d) - between the ratio $sRn+/sQs_{dob}$ values and daily sums of solar radiation (sQs) on the all analysed days (data on individual season marked differently).

słonecznych, zaznaczał się on także poprzez zróżnicowany przebieg czasowy zależności Rn od Qs (odzwierciedlany przez układ punktów na wykresach). Podczas pogody słonecznej (bezczmurnej lub o niewielkim zachmurzeniu), w przebiegu zależności wartości Rn od Qs obserwowano mniej lub bardziej wyraźnie zaznaczającą się nieliniowość (Rys. 3c i d). Stwierdzana była ona również w innych badaniach [12,16], a jej przyczynę należy upatrywać w wyższej po południu niż rano temperaturze powierzchni czynnej i różnym bilansie promieniowania długofalowego.

Równania regresji $Rn = a Qs - b$ wyznaczone na podstawie danych z poszczególnych dni na polach z uprawą pszenicy ozimej charakteryzowały wysokie, wynoszące co najmniej 0,96 współczynniki korelacji [7]. Stwierdzono, że relatywnie najwyższe i bardziej zróżnicowane wartości współczynnika kierunkowego "a" występowały w równaniach dla wybranych dni z okresu wschodów pszenicy (między 0,659 a 0,965), co mogło być związane z charakterem powierzchni czynnej oraz większym wpływem



Rys. 3. Przykłady zależności wartości bilansu promieniowania (Rn) od całkowitego promieniowania słonecznego (Qs) w przebiegu dziennym (średnie półgodzinne): a - podczas dnia o dużym zachmurzeniu (14.06.1978), b - w dniu o zmiennym lecz najwyżej umiarkowanym zachmurzeniu (18.07.1978), c i d - podczas słonecznych dni letnich (6 i 11.06.1979).

Fig. 3. Examples of variation the net radiation (Rn) with total solar radiation (Qs) during a day with overcast sky (a), with variable but moderate cloudiness (b) and sunny summer days (c, d) over winter wheat field (mean half-hourly data).

warunków atmosferycznych i glebowych (zwłaszcza temperatury) o tej porze roku. Wartości współczynników "a" w równaniach z dni letnich (przy rozwiniętej pokrywie roślinnej) mieściły się w obu sezonach w podobnym przedziale: 0,616 - 0,795 (rok 1979) i 0,635 - 0,796 (rok 1978). Warto odnotowania wydaje się spostrzeżenie, że niskie wartości współczynnika "a" stwierdzano przeważnie w dniach o dużym zachmurzeniu; nie było natomiast regułą, by najwyższe wartości tego współczynnika występowały w dniach bezchmurnych, o najwyższych sumach dziennych Q_s (co sugerowali niektórzy autorzy). Ponadto nie zauważono, by zróżnicowanie współczynników w równaniach z danego sezonu wykazywało wyraźny związek ze zmianą stanu powierzchni czynnej w jego trakcie (co mogło ewentualnie być widoczne w roku 1978, gdy wysokość i inne cechy łanu pszenicy podczas pierwszych i ostatnich rozpatrywanych dni znacznie się różniły).

Oprócz omówionej zależności $R_n = f(Q_s)$ w poszczególnych dniach, spróbowano określić tę zależność na podstawie danych z wszystkich 10 dni (łącznie) w danym sezonie, tak jak poprzednio posługując się średnimi 1/2- godzinnymi wartościami R_n i Q_s . Rozpatrywano przy tym: a) okresy występowania dodatnich wartości R_n (trwające 12 godzin latem i 7,5 jesienią) oraz b) okresy dzienne (w przybliżeniu od wschodu do zachodu słońca). Uzyskane równania - wraz z ich statystyczną charakterystyką - zestawiono w Tabeli 3. Równania te charakteryzują zależność R_n od Q_s w przebiegu dziennym niejako w sposób uśredniony, przy przeciętnym dla wybranych dni stanie pogody i powierzchni czynnej w danym sezonie. Aby uzyskać równania jeszcze bardziej ogólnie opisujące omawianą zależność dla łanu pszenicy, połączono zbiory danych z dni w 1978 i 1979 roku, otrzymując dla okresu występowania R_n równanie

$$R_n = 0,715 Q_s - 25,3 \text{ W m}^{-2} \quad (r = 0,981, R^2 = 96,3, \text{ bł. st.} = 26,1) \quad (3)$$

natomiast dla okresu dziennego:

$$R_n = 0,730 Q_s - 33,1 \text{ W m}^{-2} \quad (r = 0,988, R^2 = 97,6, \text{ bł. st.} = 25,0). \quad (4)$$

Dają one możliwość odtwarzania przebiegu dziennego R_n , choć oczywiście tylko w kształcie przybliżonym, z błędami wynikłymi z nieuwzględniania specyfiki przebiegu w

Tabela 3. Wartości współczynników w równaniach $R_n = a Q_s - b$ wyznaczonych na podstawie danych półgodzinnych (w W m^{-2}) podczas 10 rozpatrywanych dni w sezonie (łącznie), obejmujących okresy o dodatnich wartościach R_n (zbiór danych A) oraz okresy dzienne (zbiór B)

Table 3. Values of "a" and "b" coefficients in the net and solar radiation regression equations determined on the base half-hourly data (in W m^{-2}) from all selected days together in a given season for periods with positive values R_n (A) and for daily periods (B)

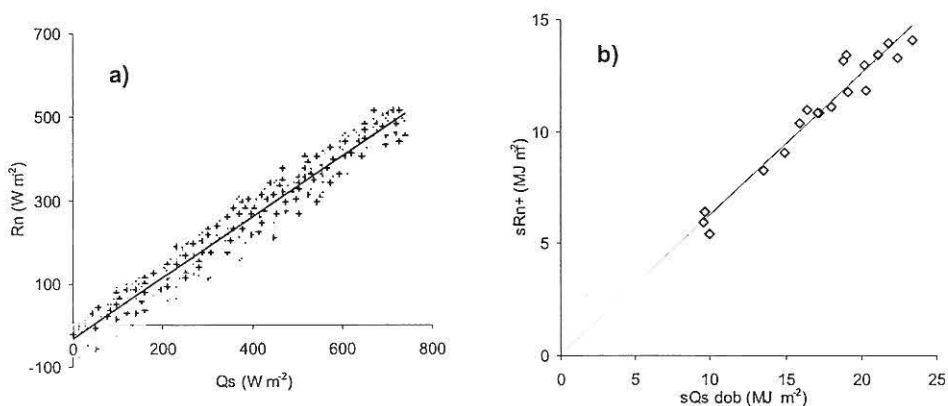
Sezon	Zbiór danych	wsp. "a"	wsp. "b"	r	R ² (%)	St. błąd szac.
1982	A	0,761	20,7	0,982	96,4	13,3
1978	A	0,737	26,1	0,985	96,9	23,3
1979	A	0,704	28,3	0,982	96,4	26,6
1982	B	0,777	24,5	0,981	96,2	14,9
1978	B	0,752	33,3	0,990	98,0	22,2
1979	B	0,716	34,7	0,988	97,6	25,7

oddzielnych dniach pod wpływem ogólnie pojętych warunków pogodowych. O możliwych błędach świadczy zróżnicowanie współczynników w równaniach dla poszczególnych dni, jak również znaczny rozrzut punktów na wykresie przedstawiającym związek między wartościami Rn i Q_s w 20 rozpatrywanych okresach dziennych (Rys. 4a).

Równie ważne, a może nawet bardziej przydatne, wydaje się określenie związku pomiędzy sumą dobową promieniowania słonecznego (sQ_s) a sumą dodatnich wartości bilansu promieniowania ($sRn+$). Korzystając z zależności $sRn+ = f(sQ_s)$ i dysponując danymi o sumach dobowych Q_s można by było bowiem oszacować ilość energii rozchodowanej w procesach wymiany ciepła i masy w danym dniu. Związek między sumami dodatnich wartości Rn na polu pszenicy a sumami dobowymi Q_s jakie zanotowano w rozpatrywanych w niniejszym opracowaniu dniach podczas okresu wiosenno-letniego 1978 i 1979 roku obrazuje wykres przedstawiony na Rys. 4b, a opisuje go równanie:

$$sRn+ = 0,631 sQ_s - 0,02 \text{ MJ m}^{-2} \quad (r = 0,971, R^2 = 94,2, \text{ bł. st.} = 0,66). \quad (5)$$

Ze względu na małą liczbę danych (tylko z 20 dni w dwóch sezonach) stanowiących bazę przy wyznaczeniu tego równania, należy je traktować jako określone wstępnie dla zielonego łąnu pszenicy i wymagające potwierdzenia na obszerniejszym materiale obserwacyjnym.



Rys. 4. Zależność bilansu promieniowania (Rn) na polu pszenicy od promieniowania słonecznego (Q_s) na podstawie wartości półgodzinnych z okresu dziennego (od wschodu do zachodu słońca) w 20 dniach wiosenno-letnich (a) oraz zależność sum dodatnich wartości bilansu promieniowania ($sRn+$) od sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego ($sQ_s\text{dob}$) uzyskana na bazie danych z tychże dni (b).

Fig. 4. Relationship between net radiation (Rn) over winter wheat field and total solar radiation (Q_s) plotted on the base a half-hourly values noted from sunrise to sunset period in 20 spring-summer days (a) and relationship between sum of positive net radiation values ($sRn+$) and daily sum of total solar radiation ($sQ_s\text{dob}$) for these days (b).

WNIOSKI

Stosunek wartości bilansu promieniowania do promieniowania słonecznego całkowitego jest różny w zależności nie tylko od rodzaju powierzchni czynnej, ale i rozpatrywanego przedziału czasowego podczas dnia (doby). Jeśli zamiast okresu dziennego (od wschodu do zachodu słońca) przyjmiemy się okres występowania dodatnich wartości bilansu promieniowania, otrzymywane są zwiększone wartości tego stosunku (jak w przypadku analizowanych w niniejszej pracy danych z pola pszenicy ozimej, o 3-7% w dniach wiosenno-letnich, a w dniach jesiennych nawet o kilkanaście procent).

Przyczyną znacznych (sięgających 20-30 % w omówionych badaniach) różnic stosunku sumy bilansu promieniowania do sumy promieniowania słonecznego określanego dla poszczególnych dni są z całą pewnością warunki pogodowe. O ile jednak ich wpływ na przebieg dzienny (czy sumy dzienne) bilansu promieniowania oraz promieniowania słonecznego jest ewidentny, to w przypadku stosunku tych strumieni nie okazał się tak jednoznaczny i łatwy do wykazania.

Zależność wartości bilansu promieniowania (R_n) od wartości całkowitego promieniowania słonecznego (Q_s) w przebiegu dziennym wystarczająco dobrze opisuje równanie regresji liniowej (za wyjątkiem dni bezchmurnych, o dużej amplitudzie temperatury powietrza i gleby). Wartości współczynników w tego typu równaniach wyznaczonych dla poszczególnych dni uzależnione są w znacznym stopniu od warunków atmosferycznych. Dokonana w pracy analiza wykazała, że obniżone wartości współczynnika kierunkowego notowano przeważnie w dniach pochmurnych. Nie było jednakże regułą, by najwyższe wartości tego współczynnika występowały w dniach bezchmurnych, o największych sumach dziennych promieniowania słonecznego.

Zróznicowanie wartości współczynników w równaniach $R_n = a Q_s - b$, jak i wartości stosunku R_n/Q_s pomiędzy poszczególnymi dniami w danym sezonie jest spowodowane oddziaływaniem również innych, niezupełnie związanych z czynnikiem solarnym warunków. Toteż przy stosowaniu określonego (jednego) równania do odtwarzania przebiegu dziennego (czy oszacowania sumy dziennej) bilansu promieniowania na podstawie znanych wartości całkowitego promieniowania słonecznego, należy liczyć się z możliwością sporych błędów.

Podziękowanie. Za owocną współpracę przy organizacji i prowadzeniu badań składam gorące podziękowania wszystkim ich uczestnikom. Szczególnie wdzięczny jestem Panu prof. dr hab. Józefowi Kołodziejowi z Katedry Agrometeorologii AR w Lublinie za udostępnienie obiektów badań oraz danych meteorologicznych i biometrycznych, jak również Panu prof. dr hab. Bonifacemu Łykowskiemu z Zakładu Meteorologii i Klimatologii SGGW w Warszawie za współpracę w pomiarach składników bilansu promieniowania i możliwość wykorzystania ich wyników w niniejszej pracy.

LITERATURA

1. **Davies J.A.:** A note on the relationship between net radiation and solar radiation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 93, 109-115, 1967.
2. **Efimowa N.A.:** Radiacionnye faktory produktivnosti rastitelnogo pokrova. *Gidromet. Izd.*, Leningrad, 1977.
3. **Feddes R.A.:** Water, heat and crop growth. *Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen*, 71-12, 1971.
4. **Fritschen L.J.:** Net and solar radiation relations over irrigated field crops. *Agr. Meteorol.*, 4, 55-62, 1967.
5. **Gay L.W.:** The regression of net upon solar radiation. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, B, 19, 1-14, 1971.
6. **Idso S.B., Baker D.G., Blad B.L.:** Relations of radiation fluxes over natural surfaces. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 95, 244-257, 1969.
7. **Kossowski J., Łykowski B.:** O relacji między promieniowaniem słonecznym a bilansem promieniowania na polu pszenicy ozimej. W: *Modelowanie i monitorowanie procesów agrofizycznych w środowisku glebowym*, (Red. R. Walczak, B. Usowicz), PTA, Lublin, 40-43, 1999.
8. **Linacre E.T.:** Estimating the net radiation flux. *Agr. Meteorol.*, 5, 49-63, 1968.
9. **Łykowski B.:** The structure of the radiation balance of selected plant surfaces. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 346, 77-83, 1987.
10. **Łykowski B., Radomski C., Kossowski J.:** Radiation and heat balance of agrocenoses. *Pol. Ecol. Stud.*, 6, 2, 113-128, 1980.
11. **Miara K., Paszyński J., Grzybowski J.:** Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski. *Przegl. Geogr.*, 59, 4, 487-509, 1987.
12. **Monteith J.L., Szeicz G.:** Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 88, 496-507, 1962.
13. **Omar M.H., Mosalam Shaltout M.A.:** Solar net radiation over a bare wet field at Giza estimated on the basis of its close relationship with global radiation. *Solar and Wind Techn.*, 5, 2, 185-189, 1988.
14. **Podogrocki J.:** Spatial distribution of global solar radiation in Poland. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, D-5(120), 17-30, 1978.
15. **Sakali L.I.:** Teplovoj balans Ukrainy i Mołdawii. *Gidromet. Izd.*, Leningrad, 1970.
16. **Stanhill G., Hofstede G.J., Kalma J.D.:** Radiation balance of natural and agricultural vegetation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 92, 128-140, 1966.

SOLAR AND NET RADIATION OVER WINTER WHEAT FIELD

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4
P.O. Box 201, 20-90 Lublin 27

S u m m a r y. The knowledge of net and solar radiation relations makes possible estimation of net radiation values from more available data of solar radiation. The result of investigations carried out on winter wheat field in Felin near Lublin were also analysed from this viewpoint in the paper. There are presented the measurement data collected during two spring-summer vegetative periods and one period of wheat emergence. For a detailed analysis the ten days during a given season were selected with a criterion of rainfall absence and different insolation conditions on these days (at overcast, moderate but variable cloudiness and clear sky). On the base of half-hourly mean values, the equations of linear regression between net and solar radiation were determined for each day and for ten days altogether during one season. Moreover, the ratio of net radiation to solar radiation sums for daily period (from sunrise to sunset) and for period with positive

(downward) net radiation values and for three-midday hours period in all the examined days were computed. It was stated that the magnitude of net to solar radiation ratio differed with regard to a considered period of a day. Differentiation of the ratio between individual days came up to 20-30 per cent in a given season. The values of coefficients in net versus solar radiation regression equations for selected days were also differentiated, however, it was more a result of weather conditions than changes in winter wheat field active surface.

K e y w o r d s: net radiation, winter wheat, radiation balance structure