acta universitatis lodziensis

FOLIA GEOGRAPHICA PHYSICA

7

Agnieszka Podstawczyńska

CECHY SOLARNE KLIMATU ŁODZI

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU ŁÓDZKIEGO • ŁÓDŹ 2007

BIBLIOTEKA

A 331/7.2007 (2)

REDAKCJA NAUKOWO-DYDAKTYCZNA
„FOLIA GEOGRAPHICA PHYSICA"
Tadeusz Krzemiński, Kazimierz Kłysik,
Paweł Jokiel, Stanisław Krysiak

RECENZENT
Maria Dubicka

REDAKTOR WYDAWNICTWA UŁ
Urszula Dzieciątkowska

REDAKTOR TECHNICZNY
Wiesława Łubiech

SKŁAD KOMPUTEROWY
Małgorzata Boczkowska

BIBLIOTEKA UNIWERSYTETU ŁÓDZKIEGO

KOREKTORZY
Danuta Bąk, Bogusława Kwiatkowska

OKŁADKĘ PROJEKTOWAŁA
Barbara Grzejszczak

Podr. P28512/7.2007

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2007

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
2007

Wydanie I. Nakład 120 egz.
Ark. druk. 18,375 + 3 wkl. Papier kl. III, 80 g, 70 × 100
Przyjęto do Wydawnictwa UŁ 7.11.2005 r.
Zam. 53/3953/2007. Cena zł 28,–

Drukarnia Uniwersytetu Łódzkiego
90-131 Łódź, ul. Lindleya 8

ISSN 1427-9711

WK 391/2007

SPIS TREŚCI

1. Wstęp 7
   1.1. Wprowadzenie i cel pracy 7
   1.2. Reżim radiacyjny klimatu Polski. Przegląd literatury klimatologicznej 8
   1.3. Uwagi o cechach solarnych klimatu miast 19
2. Materiały źródłowe 23
   2.1. Dane heliograficzne 23
   2.2. Dane aktynometryczne 30
3. Metoda opracowania 35
   3.1. Terminologia i symbole zastosowane w opracowaniu 35
   3.2. Metody analizy danych heliograficznych 38
   3.3. Metody analizy danych aktynometrycznych 42
4. Uwarunkowania dopływu energii słonecznej do powierzchni horyzontalnej w Łodzi 45
   4.1. Czynniki astronomiczne determinujące dopływ energii słonecznej do powierzchni horyzontalnej 45
   4.2. Przebieg roczny zachmurzenia w Łodzi 47
   4.3. Stan zanieczyszczenia powietrza w Łodzi 49
5. Zmienność usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000 51
   5.1. Cechy usłonecznienia rzeczywistego i względnego w biegu rocznym oraz wieloletnim 51
   5.2. Przebieg dobowy usłonecznienia 87
   5.3. Główne cechy struktury usłonecznienia w Łodzi 107
6. Ultrafioletowe i całkowite promieniowanie słoneczne w centrum Łodzi w latach 1997–2001 125
   6.1. Znaczenie promieniowania słonecznego w środowisku miejskim. Pomiary ultrafioletu w Europie i Polsce 125
   6.2. Przebieg roczny i czasowa zmienność sezonowych, miesięcznych i dobowych sum energii całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na tle sum energii na górnej granicy atmosfery 128
   6.3. Natężenie całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w centrum Łodzi w przebiegu dobowym i rocznym. Wpływ zachmurzenia na natężenie promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi 150
   6.4. Związek ultrafioletu z całkowitym promieniowaniem słonecznym. Rola zachmurzenia w kształtowaniu udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym 166

7. Wpływ miasta na dopływ promieniowania słonecznego 181
7.1. Różnice sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek 181
7.2. Różnice sum dobowych ultrafioletowego promieniowania słonecznego między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek 185
8. Związek usłonecznienia z promieniowaniem słonecznym w Łodzi 197
8.1. Zarys problemu 197
8.2. Zastosowanie formuły Blacka do szacowania sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi 201
8.3. Zastosowanie formuły Blacka do szacowania sum dobowych ultrafioletowego promieniowania słonecznego w Łodzi 206
9. Podsumowanie i wnioski 211
Wybrane charakterystyki solarne klimatu Łodzi. Załącznik 215
Literatura 261
Spis tabel 271
Spis rycin 281
The solar characteristics of climate of Łódź. Summary 293

TABLE OF CONTENTS

1. Introduction 7
   1.1. Preliminary and objectives of the research 7
   1.2. The solar radiation regime of climate of Poland. Review of the climatological studies 8
   1.3. The consideration of solar feature of urban climate 19
2. Experimental material 23
   2.1. Heliographic data 23
   2.2. Actinometrical data 30
3. The applied methods 35
   3.1. Terminology and symbols applied in the research 35
   3.2. The methods of analysis of heliographic data 38
   3.3. The methods of analysis of actinometrical data 42
4. Determinants of solar radiation inflow to horizontal surface in Łódź 45
   4.1. Astronomical factors determining inflow of solar radiation to the horizontal surface 45
   4.2. Annual course of cloudiness in Łódź 47
   4.3. The quality of air in Łódź 49
5. The variability of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 51
   5.1. The characteristics of actual and relative sunshine duration in the annual and the long-term course 51
   5.2. The daily course of sunshine duration 87
   5.3. The main characteristics of structure of sunshine duration in Łódź 107
6. Ultraviolet and total solar radiation in the center of Łódź in the period 1997–2001 125
   6.1. The significance of solar radiation in an urban area. The measurement of ultraviolet in Europe and Poland 125
   6.2. Annual course and time variability of seasonal, monthly and daily total and ultraviolet solar energy sums against a background of the values on the upper limit of the atmosphere 128
   6.3. The intensity of total and ultraviolet solar radiation in the center of Łódź in the daily and the annual course. Effect of cloudiness on solar radiation intensity at the ground level 150
   6.4. Relationship of ultraviolet and total solar radiation. Effect of cloudiness on shaping the percentage ratio of ultraviolet to total solar radiation 166
7. Effect of an urban area on solar radiation inflow 181
   7.1. Differences of the daily sums of total solar radiation between center of Łódź and the rural station Łódź-Lublinek 181

7.2. Differences of the daily sums of UV solar radiation between center of Łódź and the rural station Łódź-Lublinek 185
8. The correlation of sunshine duration and solar radiation in Łódź 197
8.1. The outline of issue 197
8.2. The application of Black formula to estimation of the daily sums of total solar radiation in Łódź 201
8.3. The application of Black formula to estimation of the daily sums of UV solar radiation in Łódź 206
9. Summary and conclusions 211
Chosen solar characteristics of climate of Łódź. Appendix 215
References 261
List of tables 271
List of figures 281
The solar characteristics of climate of Łódź. Summary 293

1. WSTĘP

1.1. WPROWADZENIE I CEL PRACY

Strumień energii promieniowania słonecznego docierający do Ziemi jest czynnikiem generującym podstawowe procesy klimatotwórcze, tj. obieg ciepła, obieg wilgoci i cyrkulację atmosferyczną. Stanowi pierwotne źródło energii dla hydrosfery, litosfery, kriosfery i biosfery. Promieniowanie słoneczne odgrywa także znaczącą rolę w środowisku życia człowieka, niosąc pozytywne i negatywne bodźce dla sfery fizjologicznej i psychicznej. Promieniowanie słoneczne dostarczając światła, kształtując warunki termiczne i higieniczne otoczenia, stwarzając możliwości wykorzystania energii w systemach grzewczych, decyduje w dużym stopniu o komforcie życia. Współczesny człowiek, świadomy dobrodziejstw i zagrożeń wynikających z oddziaływania Słońca, dąży do ciągłego poszerzania wiedzy na temat jego wpływu na środowisko przyrodnicze Ziemi, związków solarno-ziemskich, głównie w aspektach prognostycznych, czasowo-przestrzennej zmienności promieniowania słonecznego na powierzchni kuli ziemskiej, sposobów najefektywniejszego wykorzystania energii słonecznej itp. Tematy te są ciągle obecne w wielu projektach badawczych, doniesieniach naukowych, co jest dowodem ich aktualności. Problematyka solarna należy również do tradycyjnego nurtu badawczego Katedry Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Łódzkiego.

Prezentowana praca ma na celu charakterystykę podstawowych cech reżimu radiacyjnego reprezentatywnego dla Łodzi i regionu łódzkiego. Podstawą realizacji głównego celu badawczego jest analiza 50-letniej serii pomiarów usłonecznienia w Łodzi oraz kilkuletnich szeregów pomiarów promieniowania całkowitego z dwóch obszarów miasta (peryferyjnego i centrum) oraz promieniowania ultrafioletowego z centrum Łodzi.

Obserwacje czasu, w którym tarcza Słońca nie jest zasłonięta przez chmury, prowadzone w ciągu 50 lat stanowią dostatecznie długi „zapis historii" tego podstawowego komponentu solarnego klimatu, stwarzając możliwość zbadania trendu (tendencji), czyli monotonnego wzrostu czy spadku wartości ciągu danych, oraz zbadania charakteru odchyleń wartości od średniej wieloletniej. Autorka poszukuje odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób struktura usłonecznienia, opisywana liczbą dni bezsłonecznych,

pochmurnych, umiarkowanie słonecznych, słonecznych i bardzo słonecznych, wpływa na trend wykryty w 50-letnim szeregu czasowym godzin ze Słońcem? Czy cechę wieloletniej zmienności usłonecznienia stanowi periodyczność, czyli rytmiczne zmiany, w których charakterystyczna jest stałość między kolejnymi maksimami i minimami? Jakie są cechy zmienności w cyklu dobowym i rocznym podstawowych charakterystyk usłonecznienia? Ponadto celem badawczym prezentowanego opracowania było poszerzenie wiedzy na temat cech zmienności dobowej, rocznej, 5-letniej natężenia oraz sum energii całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego rejestrowanego w centrum Łodzi. Analiza miała także na celu ukazanie wzajemnych relacji wymienionych komponentów solarnych klimatu, wpływu zachmurzenia na ich wartości, różnic między wartościami promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery a wartościami rzeczywistymi rejestrowanymi przy powierzchni Ziemi. W prezentowanym opracowaniu poszukiwano odpowiedzi na pytanie o wpływ miasta na dopływ całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na podstawie analizy różnic między wartościami rejestrowanymi na stacji zamiejskiej i śródmiejskiej.

W opracowaniu podjęto problem związku usłonecznienia z sumami energii całkowitego promieniowania słonecznego w aspekcie szacowania jego wartości na podstawie usłonecznienia względnego. Celem powyższej analizy było wyznaczenie dla Łodzi współczynników do formuły empirycznej Blacka, najpowszechniej stosowanej w Polsce, pozwalającej na obliczenie wartości promieniowania słonecznego jako funkcji usłonecznienia. Ponadto poszukiwano odpowiedzi na pytanie, czy wzór Blacka opracowany na podstawie łódzkiej serii pomiarowej daje lepsze wyniki estymacji sum energii promieniowania całkowitego niż formuła z zastosowaniem uśrednionych współczynników dla całego obszaru Polski. Dodatkowym celem badawczym z zakresu tej problematyki było rozszerzenie zastosowania formuły Blacka do szacowania sum energii promieniowania ultrafioletowego.

W zamierzeniu autorki praca ta ma mieć charakter nie tylko poznawczy, ale także aplikacyjny, np. w aspekcie wykorzystania jej wyników dla rozwoju helioenergetyki w regionie łódzkim.

Pracę wykonano w ramach realizacji promotorskiego projektu badawczego 6 P04E 043 20 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2001–2003.

1.2. REŻIM RADIACYJNY KLIMATU POLSKI. PRZEGLĄD LITERATURY KLIMATOLOGICZNEJ

Podstawową wiedzę na temat radiacyjnych cech klimatu Polski zawdzięczamy pionierskim badaniom i publikacjom naukowym prof. Władysława Gorczyńskiego, z nazwiskiem którego związany jest rozwój aktynometrii

w Polsce. Popularyzując wiedzę o promieniowaniu słonecznym i nadając wagę badaniom tego elementu klimatu, profesor pisał na łamach „Gazety Obserwatora PIHM" (1950 r.):

Nie ma takiego myślącego człowieka, któryby nie uznawał, że promieniowanie słoneczne jest źródłem wszelkiego życia na ziemi. [...] Podobnie jak na ludzi, niemniej zasadniczy wpływ wywiera obecność słońca i natężenie promieniowania na świat zwierzęcy, roślinny i na całokształt stosunków fizjograficznych. [...] Nauka aktynometrii, jako tej gałęzi wiedzy, która stojąc na rubieży fizyki i meteorologii, powinna znaleźć jak najszersze rozpowszechnienie – interesuje ona bowiem zarówno meteorologa, fizyka i astronoma, jak i geografa, botanika, rolnika i lekarza.

Z inicjatywy prof. Gorczyńskiego od 1900 r. rozpoczęto w Warszawie i Gdyni pierwsze w Polsce wieloletnie pomiary natężenia promieniowania słonecznego. Obecnie stacje te posiadają najdłuższe w kraju, ponad pięćdziesięcioletnie serie pomiarów całkowitego promieniowania słonecznego. Wcześniejsze pomiary aktynometryczne na ziemiach polskich najczęściej miały charakter epizodyczny, związany z potrzebami rolnictwa i medycyny uzdrowiskowej, i pochodzą z końca XIX w. (np. stacja Puławy) (Bogdańska i in. 2002). Tłem dla pomiarów aktynometrycznych są pomiary usłonecznienia zapoczątkowane na ziemiach polskich już w latach 90. XIX w. Ponad stuletnią serię pomiarów usłonecznienia posiada Kraków i Śnieżka, a ponad pięćdziesięcioletnie serie usłonecznienia – Warszawa, Kołobrzeg, Bydgoszcz, Puławy, Gdynia, Zakopane (Bogdańska i in. 2002). Największy rozwój sieci regularnych pomiarów heliograficznych i aktynometrycznych przypada na okres po II wojnie światowej (głównie na lata 1952–1958). Ten znaczący rozwój badań stosunków radiacyjnych na obszarze Polski dostarczył materiału źródłowego dla licznych opracowań klimatologicznych opisujących w różnorodnych aspektach cechy solarne klimatu Polski.

Główne wątki badawcze pojawiające się w literaturze dotyczącej reżimu radiacyjnego klimatu Polski to:

– czasowa zmienność i regionalne zróżnicowanie usłonecznienia (np. Gorczyński 1910, 1912, 1914, 1938, 1939ab; Dziewulski 1917; Stenz 1926, 1928, 1929, 1930, 1936; Smosarski 1910; Słomka 1957; Zinkiewicz 1962; Mackiewicz 1953; Morawska-Horawska 1963, 1984, 1985, 2002; Kłysik 1969, 1974; Chomicz, Kuczmarska 1971; Kuczmarski 1977a, 1979, 1982, 1990; Kuczmarski, Paszyński 1981; Marciniak, Wójcik 1991; Wójcik, Marciniak 1993; Fortuniak 1994, 1995; Gluza, Filipiuk 1995; Górski, Górska 2000),

– czasowa zmienność i regionalne zróżnicowanie natężenia promieniowania słonecznego (np. Gorczyński 1913; Kuczmarska, Paszyński 1964; Paszyński 1966; Dubicka 1979, 1994; Podogrocki 1977, 1978; Miara, Paszyński, Grzybowski 1987; Bryś 1994, 2001; Bryś K., Bryś T. 2001; Bogdańska, Podogrocki 2000),

– struktura całkowitego promieniowania słonecznego i usłonecznienia (np. Kłysik 1969, 1974; Dubicka 1979, 1994; Podogrocki 1982; Hess, Olecki 1990; Kuczmarska, Kuczmarski 1998; Rojan 1995; Bogdańska, Podogrocki 2000),

– wpływ cyrkulacji atmosfery na dopływ promieniowania słonecznego (np. Dubicka 1994; Niedziałek 1981),

– związki zachmurzenia i cyrkulacji atmosferycznej z usłonecznieniem (np. Stenz 1929; Morawska-Horawska 1963, 1984, 1985; Kłysik 1969; Parczewski 1957; Michalczewski 1953; Trybowski 1955; Wójcik, Marciniak 1993; Dubicka 1994; Dubicka, Limanówka 1994),

– ocena usłonecznienia w aspekcie warunków bioklimatycznych miast uzdrowiskowych, tj. Rabka, Kudowa, Polanica, Zakopane, Kołobrzeg, Inowrocław i in. (np. Cieślak 1959; Michalczewski 1953; Trybowski 1955; Tyczka 1964; Zawadzka 1971; Kuczmarski 1990),

– wpływ rzeźby terenu na dopływ promieniowania słonecznego (np. Olecki 1989; Piwowarczyk 1992),

– poszukiwanie fluktuacji, trendów i periodyczności w szeregach czasowych usłonecznienia (np. Morawska-Horawska 1984, 1985, 2002; Limanówka, Ustrnul 1993; Dubicka, Karal 1988; Dubicka 1990; Dubicka, Limanówka 1994; Dubicka, Pyka 2001; Gluza, Filipiuk 1995; Fortuniak 1994, 1995, 2002),

– poszukiwanie fluktuacji, trendów i periodyczności w szeregach czasowych promieniowania słonecznego (np. Bryś K. 2001; Bryś K., Bryś T. 2001; Bogdańska, Podogrocki 2000).

Rozwój badań instrumentalnych nad radiacją słoneczną w obszarach zurbanizowanych spowodował wzrost publikacji na temat cech solarnych klimatu miast. Pojawiły się prace podejmujące problem przezroczystości atmosfery oraz redukcji natężenia bezpośredniego i całkowitego promieniowania słonecznego oraz zmniejszenia usłonecznienia w obszarach miejskich (np. Paszyński 1959; Krawczyk 1968, 1974; Mackiewicz 1957; Dziewulska-Łosiowa 1962; Wójcik 1971; Hess i in. 1980; Kozłowska-Szczęsna, Podogrocki 1995; Kuczmarska, Paszyński 1964; Morawska-Horawska 1984; Hess, Olecki 1990; Olecki 1975, 1992; Podogrocki 1992, 2002). Powstawały opracowania dotyczące zmian w strukturze całkowitego promieniowania słonecznego i wzrostu natężenia promieniowania rozproszonego nad miastem (np. Olecki 1975, 1992; Podogrocki 1982; Paszyński, Rojan 1991; Rojan 1995). Literatura dotycząca promieniowania słonecznego w przedziałach spektralnych, głównie promieniowania UV w Polsce, z uwagi na niewielką liczbę stacji pomiarowych liczy niewiele publikacji. Opracowania podejmujące charakterystykę tego elementu solarnego klimatu Polski koncentrowały się na wynikach pomiarów promieniowania w zakresie UV-B (290–320 nm) w obszarach niezurbanizowanych (Belsk, Łeba, Legionowo, Zakopane, Kas-

prowy Wierch). Pierwsze prace dotyczyły promieniowania UV w obszarach górskich (Liana 1955). Większość publikacji dotyczących ultrafioletu w Polsce odnosiła się do długoletniej serii pomiarów UVB prowadzonych od 1975 r. w Belsku, jego zmienności czasowej, związku z zawartością ozonu, zachmurzeniem, przezroczystością atmosfery (Słomka 1976, 1978, 1979, 1988, 1993, Krzyścin 1996). Szerszy zakres problematyki pomiarów i opracowań promieniowania UV w Polsce i Europie został przedstawiony w rozdz. 6.

Wymienione tu przykłady prac klimatologicznych stanowią bogate źródło wiedzy o reżimie solarnym klimatu Polski. Głównym elementem solarnym klimatu jest usłonecznienie, czyli czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi. Długość dnia, zachmurzenie i przezroczystość atmosfery decydują o wartości usłonecznienia. Podstawowymi cechami tego elementu klimatu na obszarze Polski, opisywanymi już w pionierskich pracach klimatologicznych, jest duże zróżnicowanie przestrzenne i czasowa zmienność usłonecznienia w odniesieniu do sum rocznych, sezonowych, dobowych. Pierwszą obszerną syntezą dotyczącą usłonecznienia ziem polskich jest praca W. Gorczyńskiego, wykonana na podstawie danych z 10-lecia 1896–1905 i opublikowana w 1912 r. Autor wykorzystał dane heliograficzne z 19 stacji, m.in. Krakowa, Wrocławia, Szamotuł, Tczewa, Suwałk, Ujścia Kołobrzeskiego oraz stacji leżących obecnie poza granicami Polski, tj.: Kultyngii w Kurlandii (zachodnia Łotwa), Kiszyniowa w Mołdawii, Mińska na Białorusi, Żytomierza i Humania na Ukrainie. W wymienionym opracowaniu Gorczyński tak pisał o usłonecznieniu w Polsce:

[...] sumy roczne usłonecznienia zmieniają się w dość znacznych granicach; gdy dla Warszawy suma taka nie dochodzi do 1600 godzin słonecznych, w Kiszyniowie wynosi ona 2000 godzin słonecznych. W przeciętnych dziennych odpowiada to wahaniom od 4,3 do 5,5 godzin. Jeszcze większe różnice występują dla pór roku przeważnie w jesieni; Kultynga w Kurlandii wykazuje w tym czasie przeciętnie 2,8, a Humań na Ukrainie 4,7 godzin słonecznych dziennie.

Wyniki opublikowane w omawianym opracowaniu były wielokrotnie wykorzystywane przez innych autorów jako fundament do dalszych badań, m.in. przez Dziewulskiego w opracowaniu dotyczącym Krakowa, Zakopanego i Lwowa (1917), Stenza w opracowaniu dotyczącym rozkładu geograficznego usłonecznienia w Polsce (1930) – pierwszej w polskiej literaturze klimatologicznej prezentacji kartograficznej rozkładu usłonecznienia. Wyniki Gorczyńskiego wykorzystał także Merecki w monografii pt. *Klimatologia Ziem Polskich* (1915), podkreślając za Gorczyńskim uprzywilejowanie polskiego wybrzeża pod względem liczby godzin ze słońcem, ich spadek w obrębie Prus Wschodnich i ich wzrost na „Mińszczyźnie". Ponadto Merecki stwierdza charakterystyczną depresję usłonecznienia w okolicy środkowego biegu Wisły. Dane zaczerpnięte z prac Gorczyńskiego wykorzystał do opisu

cech solarnych klimatu A. Schmuck w publikacji *Zarys klimatologii Polski* (1959), gdzie uwypuklając cechę dużej zmienności usłonecznienia z roku na rok, jak i w ciągu roku, autor pisał:

> [...] Jeśli chodzi o roczną sumę godzin słońca, to jest ona bardzo zmienna, skoro np. w Rabce w r. 1936 wyniosła 1492 godziny, a w r. 1939 aż 2009 godzin. Średnia roczna dla Rabki (1934–1953) wyniosła 1694 godziny, z czego na lato przypadło 38%, na wiosnę 28%, dla jesieni 23%, a dla zimy zaledwie 12%. [...] Średnia dla Wrocławia za okres pięciu lat (1949–1953) wynosi 1664 godziny, choć z roku na rok notowano czasem bardzo duże różnice. [...] w r. 1952 tylko 1413 godzin, a w r. 1953 aż 1907 godzin słońca.

Cechy usłonecznienia na obszarze Polski nakreślone w wymienionych fundamentalnych syntezach klimatycznych znajdują rozwinięcie w licznych późniejszych opracowaniach powstałych w oparciu o długoletni materiał heliograficzny. W syntetycznym opracowaniu autorstwa K. Chomicza i L. Kuczmarskiej (1971), dotyczącym przestrzennego zróżnicowania usłonecznienia i zachmurzenia w Polsce w 15-leciu 1951–1965, przedstawione zostały średnie wartości usłonecznienia rzeczywistego i względnego dla 56 stacji w Polce. Z map rozkładu usłonecznienia na obszarze kraju dla kolejnych miesięcy wynika, że wiosną najbardziej uprzywilejowana jest część północna, latem najbardziej słoneczna jest wschodnia i północno-wschodnia część Polski, jesienią bardziej słoneczne są obszary południowe kraju, w zimie minimum usłonecznienia przypada na północno-wschodnią część Polski, a największa liczba godzin ze słońcem występuje w obszarach górskich na południu kraju. Szczególnie wysokim usłonecznieniem w miesiącach od października do lutego wyróżnia się Kasprowy Wierch. O wartościach rocznych decydują głównie sumy usłonecznienia letniego, dlatego największe sumy roczne cechują północno-wschodnią część kraju (z maksimum w Gdyni), a najmniejsza w roku liczba godzin ze słońcem charakteryzuje południowo-zachodnią część Polski, szczególnie tereny Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (Chomicz, Kuczmarska 1971). W oparciu o serię pomiarów usłonecznienia z lat 1951–1975 dla 60 stacji M. Kuczmarski (1990) podaje, że średnia roczna suma usłonecznienia w Polsce wynosi 1526 godzin. Wśród sum miesięcznych najwyższa średnia w wymienionym 25-leciu przypada w czerwcu, 214 godzin, a najniższa w grudniu, 33 godziny. M. Kuczmarski i J. Paszyński (1981) w opracowaniu dotyczącym zmienności dobowej i sezonowej usłonecznienia w Polsce na podstawie danych z lat 1961–1970 dla 60 stacji wyróżnili trzy główne strefy usłonecznienia: północno-wschodnią z liczbą godzin ze słońcem powyżej 1550 rocznie, środkową z usłonecznieniem rocznym w przedziale 1450–1550 godzin, południowo-zachodnią z wartościami usłonecznienia poniżej 1450 godzin w roku. Autorzy podkreślali najbardziej charakterystyczną cechę rozkładu rocznej liczby godzin ze słońcem w Polsce – ogólny przebieg izolinii z północnego zachodu na południowy

wschód. W rozkładzie przestrzennym najwyższe średnie sumy roczne usłonecznienia przewyższające 1600 godzin (przeciętnie 4,5 godz. dziennie) notowane są na Wyżynie Lubelskiej, na Nizinie Południowopodlaskiej, we wschodniej części Niziny Środkowomazowieckiej oraz w środkowej części Wybrzeża Bałtyku, tj. na Pobrzeżu Słowińskim. Najniższe średnie roczne sumy usłonecznienia poniżej 1350 godz. (przeciętnie 3,5 godz. dziennie) cechują Sudety i Przedgórze Sudeckie oraz Śląsk (Kuczmarski, Paszyński 1981; Kuczmarski 1979, 1982, 1990). Obszar Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego ze względu na dużą koncentracje zanieczyszczeń wyróżnia się najkrótszym w Polce czasem dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego, przeciętnie poniżej 3,5 godzin na dobę (średnia roczna), a w grudniu dobowa wartość usłonecznienia nie przekracza 0,5 godz. (Kuczmarski, Paszyński, 1981; Paszyński, Niedźwiedź 1991). Rozkład przestrzenny tendencji zmian tego elementu solarnego na terenie GOP nie jest jednakowy i został zdeterminowany czynnikami lokalnymi (np. otoczeniem stacji, odległością od źródeł zanieczyszczeń, poziomem ochrony atmosfery itp.) (Gregorczuk, Kuczmarski 1979). T. Kozłowska-Szczęsna w opracowaniu *Antropoklimat Polski* (1991) zwraca uwagę na szczególnie niekorzystne w aspekcie bioklimatycznym warunki usłonecznienia panujące na Górnym Śląsku, gdzie liczba dni z usłonecznieniem 4 godziny (wskaźnik bioklimatyczny) jest w roku niższa o 25 w stosunku do obszarów sąsiednich.

W przebiegu rocznym najdłuższy czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego na terenie Polski przypada w czerwcu i cechuje północne regiony kraju, co jest wynikiem uwarunkowań astronomicznych (wzrost długości dnia z południa na północ w półroczu ciepłym). W półroczu ciepłym (od marca do września) najbardziej uprzywilejowane obszary kraju pod względem liczby godzin ze słońcem to Wybrzeże Bałtyku, głównie rejon Zatoki Gdańskiej i Pobrzeża Słowińskiego, gdzie notuje się w czerwcu powyżej 9 godz. ze słońcem na dobę oraz Dolina Dolnej Wisły, Pojezierze Mazurskie z wyjątkiem części wschodniej, wschodnia część Mazowsza i Nizina Podlaska, gdzie notuje się przeciętnie 8 godz. ze słońcem w czerwcu (Kuczmarski 1977a, 1990; Kuczmarski, Paszyński 1981; Kuczmarska, Kuczmarski 1998; Marciniak, Wójcik 1991; Wójcik, Marciniak 1993). Regiony południowe Polski w ciepłej połowie roku charakteryzują się spadkiem usłonecznienia wynikającym z krótszego dnia i rozwoju zachmurzenia orograficznego. Przeciętnie w czerwcu notuje się na południu Polski, w tym na terenie GOP, poniżej 6 godz. ze słońcem, a w Tatrach nawet poniżej 4 godz. (Kuczmarski 1979). W ciepłej porze roku, szczególnie w obszarach górskich, rozwój zachmurzenia konwekcyjnego wpływa na asymetrię dziennego przebiegu usłonecznienia, kiedy to dzienne maksimum czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego notuje się najczęściej w okresie przedpołudniowym (Michalczewski 1953; Parczewski 1957; Kuczmarski 1979;

Dubicka, Limanówka 1994). Najniższa suma godzin ze słońcem w roku przypada w grudniu i ze względu na wzrost długości dnia z północy na południe regiony południowe Polski wykazują w chłodnej porze roku (od września do końca lutego) uprzywilejowanie pod względem czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego. Przeciętnie ponad 2 godziny usłonecznienia na dobę w grudniu cechują obszary górskie położone powyżej 1000 m n.p.m., ponad strefą chmur warstwowych, najniższe usłonecznienie poniżej 0,5 godz. na dobę charakteryzuje Wysoczyznę Białostocką i GOP (Kuczmarski 1977a, 1979, 1990; Kuczmarska, Kuczmarski 1998).

Usłonecznienie względne, eksponujące wpływ czynnika meteorologicznego (zachmurzenia) na czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego, wynosi dla obszaru Polski 34% (dane z lat 1951–1975; Kuczmarski 1990), a jego rozkład przestrzenny i czasowa zmienność są zbieżne z rozkładem usłonecznienia rzeczywistego. Najwyższe usłonecznienie względne notowane jest latem, przeciętnie 43,4%, a najniższe zimą, przeciętnie 17,3%. Wiosna cechuje się wyższym średnim usłonecznieniem, 35,8% niż jesień, 31,1% (Kuczmarski 1990). Analiza zmienności usłonecznienia względnego z miesiąca na miesiąc dla 61 stacji w Polce przedstawiona przez Zinkiewicza (1962) wskazuje na duże i nagłe zmiany wartości tego elementu solarnego klimatu w okresie luty–marzec (wzrost) i październik–listopad (spadek). Jest to tendencja ogólnopolska, a jej przyczyną są zmiany natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego wynikającego z uwarunkowań astronomicznych oraz zmian zachmurzenia (Zinkiewicz 1962).

W chłodnej porze roku dominują w strukturze usłonecznienia dni bezsłoneczne i dni z usłonecznieniem poniżej 20% usłonecznienia możliwego, dni bardzo słonecznych z usłonecznieniem względnym powyżej 80% jest najmniej w roku, a ich maksimum przypada w miesiącach letnich (Kłysik 1974; Dubicka 1994; Dubicka, Karal, Ropuszyński 1995).

Ważnym czynnikiem determinującym dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego na obszarze Polski jest typ cyrkulacji atmosferycznej. Generalna prawidłowość polega na tym, że najkorzystniejsze warunki usłonecznienia występują, kiedy nad Polską notuje się antycyklonalne typy cyrkulacji (wg Osuchowskiej-Klein), m.in. E_1 (południowo-wschodnia i wschodnia cyrkulacja antycyklonalna), E (północno-wschodnia cyrkulacja antycyklonalna), G (centralna cyrkulacja antycyklonalna), D_2C (południowo-zachodnia i południowa cyrkulacja antycyklonalna). Cyklonalnym typom cyrkulacji, m.in. CB (północno-zachodnia cyrkulacja cyklonalna), A (zachodnia cyrkulacja cyklonalna), B (południowa cyrkulacja cyklonalna), E_0 (północno-wschodnia i wschodnia cyrkulacja cyklonalna), towarzyszy spadek wartości usłonecznienia (Kłysik 1969; Wójcik, Marciniak 1993; Paszyński, Niedźwiedź 1991; Dubicka, Limanówka 1994; Dubicka 1994).

Cechy wieloletniej zmienności usłonecznienia w różnych regionach Polski mogą wynikać z uwarunkowań makroklimatycznych oraz lokalnych związanych m.in. z oddziaływaniem antropogenicznym. W przebiegu wieloletnim czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego w Polsce jest odnotowany we wszystkich regionach kraju spadkowy trend od lat 50. do końca lat 70., wynikający ze wspólnego oddziaływania czynnika makrocyrkulacyjnego i znacznego wzrostu zanieczyszczeń atmosfery w konsekwencji intensywnej działalności przemysłowej. Ten znaczący spadek liczby godzin ze słońcem ujawnia analiza wieloletniej serii usłonecznienia w Krakowie (Morawska-Horawska 1963, 1984, 1985, 2002), Wrocławiu (Dubicka, Karal 1982; Dubicka 1990; Dubicka, Limanówka 1994; Dubicka, Pyka 2001), Lublinie (Gluza, Filipiuk 1995), Warszawie (Kozłowska-Szczęsna, Podogrocki 1995; Podogrocki 2002), Łodzi (Fortuniak 1994, 1995), Puławach (Górski, Górska 2000), Gdyni (Marciniak, Wójcik 1991), Bydgoszczy (Marciniak, Wójcik 1991), Rabce (Limanówka, Ustrnul 1991), Zakopanem (Limanówka, Ustrnul 1991; Dubicka, Limanówka 1994), na Śnieżce (Dubicka 1990; Dubicka, Limanówka 1994), na Kasprowym Wierchu (Limanówka, Ustrnul 1991). Największe sumy roczne usłonecznienia w Polsce przekraczające 2000 godzin wystąpiły w pierwszym 40-leciu XX w., np. we Wrocławiu w latach 1921, 1928, 1929, w Puławach w 1921 r., w Rabce w 1939 r. Cechą charakterystyczną przebiegu usłonecznienia w Polsce w ostatnim 20-leciu XX wieku jest dodatnia tendencja liczby godzin ze słońcem, odnotowana w różnych regionach kraju (Dubicka, Pyka 2001; Morawska-Horawska 2002; Kożuchowski i in. 2000).

Czasowo-przestrzenny rozkład usłonecznienia w Polsce znajduje odbicie w cechach zmienności całkowitego promieniowania słonecznego. Autorzy pierwszych prac prezentujących rozkład geograficzny promieniowania całkowitego na obszarze Polski to L. Kuczmarska i J. Paszyński (1964a, 1964b). Zmienność przestrzenna promieniowania całkowitego została również zaprezentowana w pierwszym w Polsce *Atlasie bilansu promieniowania* pod red. J. Paszyńskiego (1966). W opracowaniach tych wykorzystano dane o promieniowaniu całkowitym wyznaczone za pomocą empirycznego wzoru Blacka z zastosowaniem współczynników dla pasa równoleżnikowego 51°–52°N. Zależność między promieniowaniem całkowitym a usłonecznieniem w celu wyznaczenia nowych współczynników regresji do wzoru Blacka dla obszaru Polski badała L. Kuczmarska (1970) i J. Podogrocki (1978). Rezultaty badań tych autorów zostały szerzej omówione w rozdz. 6. W oparciu o dane empiryczne z 10 stacji w Polsce, m.in. Gdyni, Kołobrzegu, Warszawy, Zakopanego, Kasprowego Wierchu i in., J. Podogrocki (1977) przedstawił przebieg dobowy i roczny, zmienność czasową promieniowania całkowitego oraz prawdopodobieństwo wystąpienia sum dziennych w poszczególnych miesiącach. Rozkład przestrzenny składników

bilansu promieniowania w Polsce, w tym dobowe sumy całkowitego promieniowania słonecznego wyznaczone metodą pośrednią dla okresu 1956–1975 dla 31 stacji w Polsce, przedstawili K. Miara, J. Paszyński, J. Grzybowski (1987). Wyniki tego opracowania były wykorzystywane w syntezach dotyczących klimatu Polski m.in. przez J. Paszyńskiego i T. Niedźwiedzia (1991) oraz A. Wosia (1999). Szczegółową charakterystykę czasowo-przestrzennego rozkładu promieniowania całkowitego w Polsce przedstawili J. Paszyński i T. Niedźwiedź w syntezie klimatu Polski (1991). B. Bogdańska i J. Podogrocki (2000) zaprezentowali analizę zmienności i tendencje zmian całkowitego promieniowania słonecznego w latach 1961-1995 w następujących regionach Polski: na Wybrzeżu Bałtyckim reprezentowanym przez stacje Gdynia i Kołobrzeg, w Polsce Północno-Wschodniej reprezentowanej przez stacje Suwałki i Mikołajki, w Polsce Środkowej – Warszawa-Bielany, w strefie górskiej – Zakopane, w strefie wysokogórskiej – Kasprowy Wierch.

Według danych z okresu 1961–1995 średnia roczna suma całkowitego promieniowania słonecznego w środkowej części polskiego wybrzeża wynosi 3829 MJm^{-2}, w Polsce Północno-Wschodniej na stacji Suwałki średnia roczna suma całkowitego promieniowania słonecznego wynosi 3528 MJm^{-2}, podczas gdy w Mikołajkach 3636 MJm^{-2}. W Warszawie notuje się rocznie średnio 3538 MJm^{-2} energii całkowitego promieniowania słonecznego. W Zakopanem przeciętna suma roczna całkowitego promieniowania słonecznego wynosi 3576 MJm^{-2}, a w strefie wysokogórskiej, na Kasprowym Wierchu 3839 MJm^{-2} (Bogdańska, Podogrocki 2000). Tendencje rocznych sum promieniowania całkowitego w latach 1961–1995 w różnych regionach Polski wykazują dodatni trend, m.in. w Gdyni, Kołobrzegu, Mikołajkach, Warszawie, Wrocławiu, na Kasprowym Wierchu (Bogdańska, Podogrocki 2000, Bryś K., Bryś T. 2001).

Generalną cechą przebiegu izolinii sum promieniowania całkowitego na obszarze Polski jest przebieg równoleżnikowy w półroczu chłodnym, przy spadku wartości z południa na północ oraz ogólny wzrost wartości sum promieniowania z zachodu na wschód i północny wschód w półroczu ciepłym. Ten charakter rozkładu przestrzennego sum całkowitego promieniowania w Polsce wynika z uwarunkowań astronomicznych (długości dnia, wysokości słońca nad horyzontem), a także z charakteru cyrkulacji atmosferycznej decydującej o występowaniu mas powietrza o różnej przezroczystości i wilgotności (Kuczmarska, Paszyński 1964ab; Paszyński, Niedźwiedź 1991). Średnie sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego dla całego obszaru Polski zmieniają się od 1,5 MJm^{-2} w grudniu do 20,5 MJm^{-2} w czerwcu (Paszyński, Niedźwiedź 1991). W okresie od października do lutego południowe regiony kraju, a głównie obszar Tatr, są najbardziej uprzywilejowane pod względem sum energii całkowitego promieniowania słonecznego. W tej części roku najniższe wartości promieniowania całkowitego, poniżej 1,5 MJm^{-2} na dobę w grudniu, otrzymują północne krańce

Polski, wschodnia część polskiego wybrzeża. W okresie lata największe sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego, ponad 20,5 MJm^{-2}, charakteryzują Pobrzeże Słowińskie i rejon Zatoki Gdańskiej, a najniższe notowane są w obszarach górskich – poniżej 17 MJm^{-2} w czerwcu. Regionem o najmniejszych sumach promieniowania całkowitego w Polsce we wszystkich sezonach roku jest Górnośląski Okręg Przemysłowy, gdzie notuje się także istotną zmianę struktury promieniowania całkowitego, przejawiającą się znacznie większym udziałem promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym w stosunku do obszarów sąsiednich (Kuczmarska, Paszyński 1964b; Wójcik 1971; Paszyński, Niedźwiedź 1991; Rojan 1995). Analiza rozkładu geograficznego średnich miesięcznych wartości procentowego udziału promieniowania rozproszonego w całkowitym wykazała, że jest on wyższy zimą niż latem i w niektórych regionach Polski w zimie może przekraczać nawet 90%, podczas gdy latem maksymalne wartości wynoszą ok. 60%. Latem udział promieniowania rozproszonego jest wyższy na południu Polski (ponad 60%) niż na północy (poniżej 50%). Zimą zróżnicowanie przestrzenne tej charakterystyki jest mniejsze i nie wykazuje wyraźnego związku z szerokością geograficzną (Rojan 1995).

Jednym z istotnych elementów solarnych klimatu danego obszaru jest natężenie ultrafioletowego promieniowania słonecznego, decydujące o możliwościach wykorzystania w helioterapii jako naturalny czynnik leczniczy. Obszar Polski według kryterium czynników astronomicznych położony jest w strefie optymalnego natężenia promieniowania ultrafioletowego, co oznacza możliwość wykorzystania tego zakresu promieniowania słonecznego w medycynie uzdrowiskowej jako element klimatoterapii. Granice tej strefy wyznaczają równoleżniki 57°5'N i 42°5'N (Daniłowa 1988). Aktywność biologiczna promieniowania UV jest wykorzystywana od powyżej wysokości Słońca nad horyzontem wynoszącej 30°, a warunki takie panują w Polsce w miesiącach od kwietnia do września (Kozłowska-Szczęsna 1991). W lecie (VI–VIII) na terytorium Polski wysokość słońca nad horyzontem ponad 30° występuje w przedziale godzinnym 8.00–16.00 i w tym czasie istnieją najlepsze w roku potencjalne warunki dla helioterapii. Najkrótszymi dawkami rumieniowymi (czas ekspozycji na promieniowanie słoneczne wywołujący rumień skóry) latem cechują się obszary nadmorskie, np. Pobrzeże Słowińskie, przy najwyższej wysokości słońca nie przekraczają one 40 min (Kuczmarski 1977b).

Na dotychczasową charakterystykę stosunków solarnych w Łodzi składają się opracowania dotyczące serii pomiarów usłonecznienia, prowadzonych od 1951 r. na stacji IMGW Łódź-Lublinek (S-W peryferia miasta) oraz serii pomiarów promieniowania całkowitego i ultrafioletowego, prowadzonych od 1997 roku przez automatyczną stację meteorologiczną Katedry Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Łódzkiego, zlokalizowaną w centrum Łodzi. Obraz stosunków radiacyjnych Łodzi uzupełniają najnowsze prace omawiające składniki bilansu radiacyjnego z lat 2001–2003 (m.in.: Fortuniak i in.

2001; Offerle i in. 2002; Fortuniak 2003), powstałe w ramach badań elementów bilansu energetycznego powierzchni czynnej miasta, a prowadzone wspólnie przez Katedrę Meteorologii i Klimatologii UŁ i Instytut Geografii w Indiana University (USA). Materiał źródłowy do wymienionych analiz składników bilansu cieplnego miasta dostarcza system pomiarowy składników bilansu energetycznego, działający w centrum Łodzi od listopada 2000 r.

Pierwszą pracą omawiającą cechy reżimu usłonecznienia w Łodzi na tle innych stacji w Polsce jest praca K. Kłysika (1969). Autor dokonał analizy danych o czasie dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego w latach 1956–1961 dla wybranych stacji z różnych regionów Polski w odniesieniu do aktualnej sytuacji synoptycznej. Autor podkreśla, że Łódź pod względem przebiegu rocznego usłonecznienia odróżnia się od regionów północnych i południowych mniejszą kontrastowością lata i zimy oraz ostrym przejściem miedzy „złotą jesienią" a „szarugą jesienną". W artykule zaprezentowana została struktura usłonecznienia w 10-procentowych przedziałach usłonecznienia możliwego oraz frekwencja dni w sześciu klasach usłonecznienia (dni bezsłoneczne, prawie bezsłoneczne, chmurne, pogodne, bardzo pogodne i słoneczne). W Łodzi zaznacza się łagodne przejście liczby dni bezsłonecznych od miesięcy zimowych do letnich. Dni bezsłonecznych najwięcej wystąpiło w kwietniu, a dni słonecznych najwięcej w maju i we wrześniu (Kłysik 1969). Cechy dobowego i rocznego przebiegu usłonecznienia w Łodzi w dekadzie 1951–1960 zostały przedstawione przez K. Kłysika w pracy opublikowanej w 1974 r. Oprócz zmienności dobowej i rocznej usłonecznienia rzeczywistego, w artykule przedstawiono metodę graficzną wyznaczania usłonecznienia względnego, scharakteryzowano jego zmienność oraz zaprezentowano wybrane cechy strukturalne czasu trwania usłonecznienia. Autor podkreśla, że cechą charakterystyczną przebiegu usłonecznienia w Łodzi jest występowanie kilkudniowych okresów bezsłonecznych w zimie i w lecie oraz przewaga w roku liczby dni z usłonecznieniem poniżej 20% możliwego i niewielki udział (średnio 12,4%) w roku dni z usłonecznieniem powyżej 80% możliwego (Kłysik 1974). Szczegółową analizę cech zmienności usłonecznienia w Łodzi przeprowadził w oparciu o 40-letnią serię pomiarów (lata 1951–1990) K. Fortuniak (1994, 1995). Autor wykazał istnienie dodatniego trendu sum rocznych oraz istotnego statystycznie wzrostu sum usłonecznienia w maju i spadku we wrześniu. Analiza zmienności usłonecznienia w przedziałach godzinnych ujawniła przyrost czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego w godzinach przedwieczornych. To zjawisko w opinii autora może wynikać z wpływu aglomeracji łódzkiej na usłonecznienie obszarów peryferyjnych miasta, gdzie prowadzone są pomiary heliograficzne (Fortuniak 1994, 1995). K. Fortuniak jest również autorem nowatorskiego opracowania dotyczącego analizy czasowego przebiegu usłonecznienia względnego na stacji Łódź-Lublinek, przeprowadzonej przy zastosowaniu

skalowania fraktalnego (2002). W opracowaniu oszacowano wymiary fraktalne dla kolejnych progów usłonecznienia względnego i określono przedziały czasowe, dla których usłonecznienie wykazuje własność skalowania. Opis cech reżimu solarnego Łodzi w aspekcie porównania zmienności usłonecznienia i całkowitego promieniowania słonecznego w dwóch dekadach, tj. 1959–1968 i 1989–1998, zawiera opracowanie pt. *Pory roku w Polsce. Sezonowe zmiany w środowisku a wieloletnie tendencje klimatyczne* pod redakcją K. Kożuchowskiego (2000). Autorzy stwierdzili istotny przyrost sum usłonecznienia w Łodzi w dekadzie 1989–1998. Przyrost ten dotyczy wszystkich pór roku z wyjątkiem jesieni (spadek m.in. we wrześniu), największy wzrost liczby godzin ze słońcem obserwowany jest w zimie (m.in. w styczniu) i na wiosnę (m.in. w maju). Maksimum sum miesięcznych usłonecznienia uległo przesunięciu z czerwca na lipiec. Analiza wartości całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi w 10-leciu 1989–1998, aproksymowanych na podstawie danych dotyczących Warszawy, wykazała – podobnie jak w przypadku usłonecznienia – przyrost sum energii całkowitego promieniowania słonecznego w stosunku do lat 60. (Kożuchowski i in. 2000). Druga dekada w opinii autorów cechuje się również znaczącym wzrostem promieniowania erytemalnego (UVB) w Łodzi i skróceniem średnich dawek rumieniowych. Rozpoczęte w 1997 r. pomiary średnich 10-minutowych wartości natężenia całkowitego i ultrafioletowego (UVA + UVB) promieniowania słonecznego w centrum Łodzi dostarczyły materiału źródłowego do analizy dynamiki tych elementów klimatu solarnego Łodzi. W opracowaniach dotyczących pierwszej serii pomiarów przedstawiono cechy dobowego i rocznego przebiegu promieniowania UV na tle przebiegu promieniowania całkowitego, określono wzajemne relacje między promieniowaniem UV i całkowitym, badano zmienność procentowego udziału ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym w warunkach pogody bezchmurnej i w różnych typach zachmurzenia, porównano sumy energii promieniowania całkowitego i UV oraz udział procentowy promieniowania UV w całkowitym rejestrowanym w kanionie ulicznym Łodzi i na stacji o nieprzesłoniętym horyzoncie (Podstawczyńska, Fortuniak 1998; Podstawczyńska-Bienias 2000a, 2000b, 2001; Podstawczyńska 2002; Podstawczyńska, Pawlak 2003).

1.3. UWAGI O CECHACH SOLARNYCH KLIMATU MIAST

Podstawowe czynniki kształtujące reżim radiacyjny na obszarach zurbanizowanych to koncentracja pyłowych i gazowych zanieczyszczeń powietrza, odmienne właściwości podłoża złożonego z materiałów o różnorodnych właściwościach fizycznych, geometryczne cechy zabudowy – układy ulic, konfiguracja budynków (Landsberg 1981; Oke 1987; Lewińska i in. 1990;

Terjung, Louie 1973). Za pierwszą pracę opisującą odrębność klimatu miasta i jednocześnie rozpoczynającą badania klimatu miast uznano publikację L. Howarda pt. *The Climate of London*, wydaną w 1818 r. (kolejne wydania: 1820, 1833) (Kozłowska-Szczęsna 1991). Pierwsze prace wskazujące na zmniejszenie usłonecznienia i natężenia promieniowania słonecznego w miastach datują się na lata 20. i 30. XX w. i są to publikacje m.in. L. Bessona dla Paryża, W. Martena dla Poczdamu, J.F. Handa dla Waszyngtonu, K. Bütnera dla Berlina i Poczdamu, J.R. Ashwortha dla miast przemysłowych Anglii, G. Liandrata dla Lyonu, F. Steinhausera dla Wiednia (za: Hess i in. 1980). Bütner, Ashworth i Liandrat w swoich badaniach zwrócili uwagę na silną redukcję ultrafioletowej części widma promieniowania słonecznego w zanieczyszczonej atmosferze miejskiej. F. Steinhauser wykazał, że sumy energii promieniowania słonecznego są najmniejsze w centrum miasta, a redukcja natężenia promieniowania słonecznego jest wprost proporcjonalna do wielkości zabudowy miejskiej. Współczesne badania takich autorytetów naukowych klimatologii miejskiej jak H. Landsberg i T. Oke dowodzą, iż przeciętnie obszary zurbanizowane zmniejszają dopływ całkowitego promieniowania słonecznego w stosunku do obszarów zamiejskich od kilku procent do ok. 10% w przypadku sum rocznych (Oke 1987), ok. 20% w przypadku sum miesięcznych do ponad 30% w poszczególnych dniach w zimie (Landsberg 1981). T. Oke zwraca uwagę na przeciętnie 40-procentowe straty promieniowania UV w atmosferze miejskiej, a w skrajnych przypadkach na redukcję ultrafioletu nawet w 90% (Oke 1987). Silna redukcja ultrafioletowej części widma promieniowania słonecznego w atmosferze miejskiej pogarsza warunki aerosanitarne powietrza, stwarzając negatywne bodźce dla organizmu człowieka zaburzające homeostazę ustroju. Autor podkreśla istnienie w ostatnich latach tendencji malejącej w osłabianiu promieniowania słonecznego w miastach o 2–10% w stosunku do lat wcześniejszych, w wyniku zmniejszania zanieczyszczeń powietrza na skutek intensywnych działań na rzecz ochrony atmosfery.

W polskiej literaturze klimatologicznej pierwsze prace podejmujące problem redukcji promieniowania słonecznego w miastach odnosiły się do pomiarów całkowitego promieniowania słonecznego zainicjowanych przez W. Gorczyńskiego w Warszawie w 1900 r. Za prekursora tematyki osłabiającego wpływu zanieczyszczonej atmosfery dużego ośrodka miejskiego na natężenie promieniowania słonecznego w polskich publikacjach nurtu klimatologii miejskiej obok W. Gorczyńskiego uważany jest E. Stenz. Autor ten jako pierwszy podał w swoim opracowaniu z 1922 r., że „warstwa dymu i suchej mgły" nad Warszawą obniża natężenie promieniowania słonecznego o 10%. R. Merecki w pracy *Klimatologia Ziem Polskich* (1915) oszacował zmniejszenie sum rocznych usłonecznienia w Warszawie o 6%, tj. o ok. 100 godzin w stosunku do terenów zamiejskich.

Począwszy od lat 50., zagadnienie wpływu obszarów zurbanizowanych na stosunki radiacyjne stało się popularnym zagadnieniem badawczym realizowanym przez ośrodki naukowe w Polsce, głównie w związku ze zmianami demograficznymi, które zaszły w kraju (przeciętnie dwukrotny wzrost liczby mieszkańców dużych miast), oraz intensywnym rozwojem przemysłu, a w konsekwencji pogorszeniem warunków aerosanitarnych. Prowadzono badania przezroczystości atmosfery m.in. w Bydgoszczy (Paszyński 1959), w Warszawie (Dziewulska-Łosiowa 1962; Krawczyk 1968; Krawczyk 1974), Raciborzu (Śląsk) (Mackiewicz 1957), na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (Paszyński 1964; Wójcik 1971), w Krakowie (Olecki 1973, 1975; Hess i in. 1980; Hess, Olecki 1990; Olecki 1992). Wpływ zadymionej atmosfery Zakopanego na natężenie promieniowania słonecznego w stosunku do obszaru wysokogórskiego był przedmiotem badań F. Liany (1955) i S. Zakrenta (1955). Intensywne badania wpływu miasta na reżim radiacyjny w oparciu o wieloletni materiał obserwacyjny były prowadzone w ośrodku krakowskim. Analiza ponad stuletniej serii usłonecznienia w Krakowie przeprowadzona przez M. Morawską-Horawską (1984, 1985, 2002) wykazała największy spadek liczby godzin ze słońcem (przeciętnie – 11,6 godz./rok) w latach 1950–1970, na które przypada największy terytorialny i demograficzny rozwój miasta i wzrost zanieczyszczeń powietrza. W latach 1975–1990 wystąpił wzrost usłonecznienia i liczby dni pogodnych, którego przyczyny obok czynników naturalnych związane są z poprawą jakości powietrza w Krakowie (Morawska-Horawska 2002). Środowisko miejskie Krakowa w wyniku zmniejszonej przezroczystości powietrza wpływa na zmniejszenie całkowitych sum energii promieniowania słonecznego o 10–25% w stosunku do obszarów zamiejskich (Hess, Olecki 1990). W zimie bezpośrednie promieniowanie słoneczne w Krakowie jest przeciętnie niższe o 30–40%, a w skrajnych przypadkach nawet o 60%. Latem różnice w dopływie promieniowania bezpośredniego są niższe i wynoszą 10–15% na niekorzyść miasta (Olecki 1975, 2002). Na obszarze aglomeracji krakowskiej notuje się wzrost promieniowania rozproszonego przeciętnie o ok. 12%, a w skrajnych przypadkach nawet o 50%, w stosunku do terenów położonych poza zasięgiem miejskich zanieczyszczeń (Olecki 1973, Hess i in. 1980). Natężenie promieniowania rozproszonego w Krakowie zwiększyło się od ok. 150 Wm^{-2} na przełomie lat 60. i 70. do nawet powyżej 300 Wm^{-2} w latach 80. Maksymalne natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego w tych latach uległo zmniejszeniu od 800 Wm^{-2} do poniżej 700 Wm^{-2} (Olecki 2002). Podobnie jak w Krakowie, wieloletnie pomiary usłonecznienia i promieniowania słonecznego prowadzone w Warszawie dostarczyły wiedzy na temat cech solarnych obszarów wielkomiejskich. J. Podogrocki (2002) na podstawie analizy 90-letniej serii usłonecznienia podaje, że różnica sum rocznych godzin ze słońcem rejestrowana w centrum Warszawy jest niższa

przeciętnie o 150 godzin od wartości notowanych na peryferiach miasta, tj. ok. 10%. Przebieg dzienny usłonecznienia charakteryzuje skrócenie jego rejestracji przy niskich wysokościach Słońca o 40 do 90 min, czego powodem jest osłabienie dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego przez zanieczyszczoną atmosferę miejską (Podogrocki 2002). Różnice w dopływie promieniowania całkowitego między Warszawą a stacjami zamiejskimi w poszczególnych miesiącach wielolecia 1961–1990 wahają się od ok. 4 MJm^{-2} w listopadzie i grudniu do 22 MJm^{-2} i 19 MJm^{-2} w marcu (Błażejczyk 2002). W wartościach względnych różnice te wynoszą w mieście w stosunku do terenu zamiejskiego przeciętnie od – 2,1% w lipcu do – 13,6% w styczniu. W odniesieniu do sum rocznych zmniejszenie promieniowania całkowitego w Warszawie wynosi około 300 MJm^{-2}, tj. ok. 8% (Kozłowska-Szczęsna, Podogrocki 1995). Badania nad strukturą promieniowania całkowitego w Warszawie i w Mikołajkach wykazały istotny wzrost udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym dla Warszawy, bardzo wyraźny od początku lat 70. (Bogdańska, Podogrocki 2000). Wzrostem udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym na obszarze Polski obok Warszawy i Krakowa wyróżniają się również inne zurbanizowane i uprzemysłowione ośrodki, m.in. aglomeracja wrocławska, Górnośląski Okręg Przemysłowy, Rybnicki Okręg Węglowy (Rojan 1995).

Cechy reżimu solarnego obszarów zurbanizowanych są ciągle aktualnym przedmiotem badań w świetle wagi problemu dla kształtowania jakości życia człowieka w miastach.

2. MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE

2.1. DANE HELIOGRAFICZNE

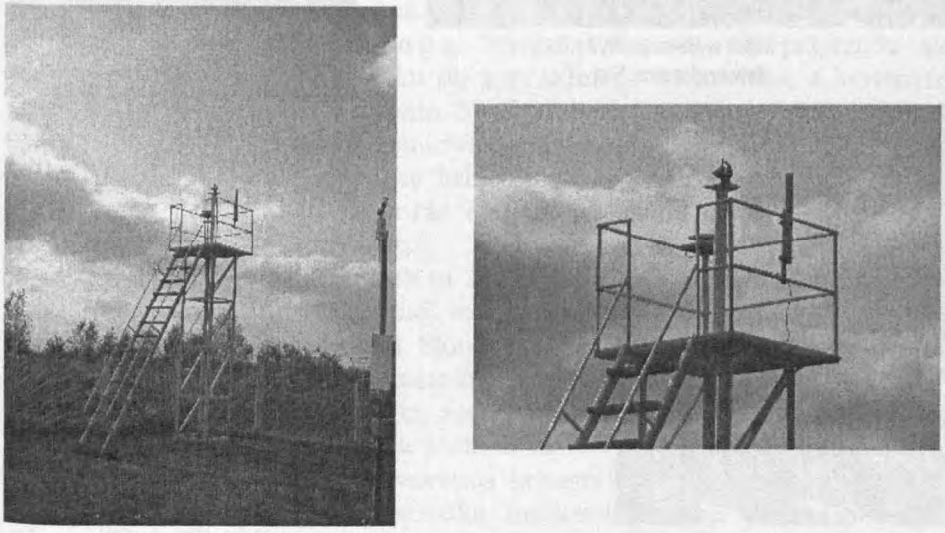
W prezentowanym opracowaniu wykorzystano materiał heliograficzny ze stacji Łódź-Lublinek w postaci sum dobowych i sum miesięcznych usłonecznienia rzeczywistego w przedziałach godzinnych z lat 1951–2000. Ten materiał źródłowy stanowi wszystkie dostępne w ciągłej serii obserwacyjnej dane o usłonecznieniu w Łodzi i został udostępniony przez archiwum IMGW. Heliogramy jako bezpośredni wynik pomiaru usłonecznienia były opracowywane na stacji Lublinek i przesyłane do centralnej bazy danych sieci meteorologicznej (PIHM, IMGW). Dane źródłowe były poddawane szczegółowej kontroli merytorycznej i weryfikacji przez Zespół Aktynometrii w Ośrodku Meteorologii Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, a następnie włączane do Bazy Danych Aktynometrycznych.

Historia pomiarów heliograficznych w Łodzi sięga 1932 r., kiedy to zainstalowano heliograf typu Campbella-Stokesa na utworzonym dwa lata wcześniej wojskowym posterunku meteorologicznym na terenie lotniska Lublinek. Brak informacji na temat lokalizacji heliografu oraz niepewność wyników ze względu na jakość wykonywanych pomiarów (pomiary heliograficzne były prowadzone przez niewykwalifikowanych obserwatorów – wojskowych szeregowców) sprawia, że przedwojenna seria danych heliograficznych jest niehomogeniczna. Posterunek wojskowy na Lublinku funkcjonował do 31 VII 1939. Dnia 1 IV 1940 posterunek przeszedł pod zarząd niemiecki, pod którym pozostał do końca 1944. W maju 1945 r. wojska radzieckie przekazały posterunek meteorologiczny Państwowemu Instytutowi Hydrologiczno-Meteorologicznemu. Regularne obserwacje, z wyjątkiem pomiarów heliograficznych (brak przyrządu), wznowiono 16 V 1945 r. Heliograf zainstalowano ponownie 1 VI 1949 r., ale ciągła seria obserwacyjna dostępna jest od stycznia 1951 r. i nie należy ona do najdłuższych w Polsce. Najdłuższe ciągi pomiarowe usłonecznienia w Polsce pochodzą z końca XIX i początku XX w. Stacje o najdłuższych seriach obserwacyjnych to: Kraków (od 1883 r.), Warszawa (od 1904 r.), Bydgoszcz (od 1909 r.), Wrocław (od

B.U.Ł.

1889 r.), Śnieżka (od 1900 r.), Kołobrzeg (od 1890 r.), Zakopane (od 1911 r.), Puławy (od 1923 r., stacja Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstawa) (Bogdańska i in. 2002; Wójcik, Marciniak, 1993). Na lata po II wojnie światowej przypada największy rozwój sieci pomiarów promieniowania słonecznego. Polska sieć heliograficzna, stanowiąca tło dla stacji aktynometrycznych, liczy obecnie ok. 100 punktów pomiarowych. Podstawowym przyrządem do pomiarów usłonecznienia w polskiej sieci heliograficznej jest heliograf typu Campbella-Stokesa. Metoda rejestracji usłonecznienia heliografem Campbella-Stokesa polega na wykorzystaniu cieplnych właściwości promieniowania słonecznego. Heliograf został skonstruowany w 1860 r. w Anglii. Pierwszy heliograf w Polsce zaczął funkcjonować od 1883 r. w Krakowie, a od 1902 r. w Warszawie. Głównym elementem heliografu jest kula o średnicy 96 mm wykonana z bezbarwnego szkła (przezroczystość dla promieniowania ok. 70% przy wysokości Słońca nad horyzontem 15°, Słomka 1957), która pełni rolę soczewki, ogniskując promienie słoneczne wypalające ślad na paskach papieru barwy granatowej. Interwał czasowy podziałki na heliogramach wynosi 30 min. Czynniki astronomiczne (zmiana wysokości Słońca nad horyzontem i zmiana pozornej ścieżki Słońca w ciągu roku) determinują ślad wypalany przez wiązkę promieni słonecznych, a tym samym rodzaj pasków stosowanych w heliografach. W ciągu roku stosuje się trzy rodzaje pasków: tzw. wiosenno-jesienne (proste) – w terminie od 1 marca do 15 kwietnia oraz od 1 września do 15 listopada, letnie (długie i zakrzywione) – od 16 kwietnia do 31 sierpnia, zimowe (krótkie i zakrzywione) – od 16 listopada do 28/29 lutego. Heliograf ustawia się na powierzchni poziomej w płaszczyźnie południka, orientując przyrząd na szerokość geograficzną stacji. Głównym kryterium rzetelności pomiarów usłonecznienia jest odsłonięcie horyzontu dla heliografu, umożliwiające ciągły dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego od wschodu do zachodu Słońca. Kąt wzniesienia obiektów na horyzoncie (A) od strony południowej powinien wynosić: $A < 66°33' - \varphi$; φ – szerokość geograficzna stacji. Od wschodu i zachodu kąt wzniesienia obiektów nie powinien przekraczać 5°. Jest to graniczna wysokość Słońca nad horyzontem, powyżej której rozpoczyna się rejestracja usłonecznienia. Wartością progową czułości heliografu w jednostkach natężenia promieniowania jest 120 Wm^{-2} (wg instrukcji IMGW). Ponadto na skrócenie rejestracji usłonecznienia względem wschodów i zachodów Słońca wywiera wpływ zwiększona ekstynkcja promieniowania słonecznego, mgły i zamglenia, głównie przy niskich położeniach Słońca. Na skrócenie czasu rejestrowanego dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego do heliografu może mieć wpływ tzw. efekt kulisowy (Kłysik 1974; Słomka 1957). Jest to perspektywiczne skrócenie obszarów nieba niepokrytych chmurami. Przy niskich położeniach Słońca zachmurzenie

nietworzące ciągłej powłoki całkowicie ogranicza dopływ promieniowania bezpośredniego do heliografu. Z powyższych względów obraz rzeczywistego usłonecznienia w danym miejscu może zatem ulec zniekształceniu. Poza wymienionymi przyczynami na rejestrację usłonecznienia może wpływać rodzaj papieru zastosowany w paskach heliograficznych (kolor pasków i właściwości papieru) oraz właściwości szkła (przezroczystość) kul heliograficznych. Trudno jednak dokładnie oszacować wpływ tych czynników na wyniki pomiarów (Słomka 1957; Morawska 1963). Według danych otrzymanych od Zespołu Aktynometrii Ośrodka Meteorologii IMGW w Warszawie, każda zmiana rodzaju pasków heliograficznych stosowanych na stacjach IMGW, w tym na stacji Łódź-Lublinek, była poprzedzona testem wpływu nowych parametrów pasków (gramatura, rodzaj papieru) na wyniki pomiarów. Wszystkich zmian pasków heliograficznych dokonywano z zachowaniem jednorodności serii pomiarowej. Pomimo pewnych niedogodności rejestracji usłonecznienia heliografem Campbella-Stokesa, jak czułość progowa, bezwładność przyrządu, możliwość odczytu tylko z dokładnością 5 min (Pawlak 1988), przyrząd ten jest popularnym miernikiem usłonecznienia zapewniającym dostępność wieloletnich serii pomiarowych.



Ryc. 2.1.1. Fotografia wieży aktynometrycznej w ogródku meteorologicznym stacji IMGW Łódź-Lublinek – miejsce lokalizacji heliografu i pyranometru
(wyk. A. Podstawczyńska, 2003)

Fig. 2.1.1. The photography of the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station (Institute of Meteorology and Water Management station) – the location site of heliograph and pyranometer
(photo by A. Podstawczyńska, 2003)

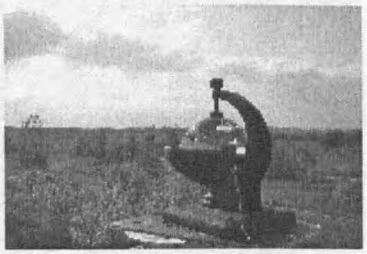
Stacja Łódź-Lublinek położona jest na południowo-zachodnich peryferiach Łodzi (najniżej położona część miasta), na lotnisku Lublinek ($H_s = 187$ m n.p.m.; $\varphi = 51°43'38''$N; $\lambda = 19°24'08''$E). Teren jest lekko pofalowany, łagodnie opadający w kierunku południowym ku dolinie rzek Jasieni i Olechówki (dopływy Neru, odległość od rzeki Ner z Lotniskowego Biura Meteorologicznego wynosi 1,5 km). Odległość od zwartej zabudowy miejskiej rozciągającej się w kierunku NE-SE wynosi 1,5–3 km, a od centrum miasta (stacji MSM Łódź-Fabryczna) ok. 7 km.

widok w kierunku NW
view in direction NW

widok w kierunku SE
view in direction SE

widok w kierunku S
view in direction S

widok w kierunku NE
view in direction NE



widok w kierunku SW
view in direction SW

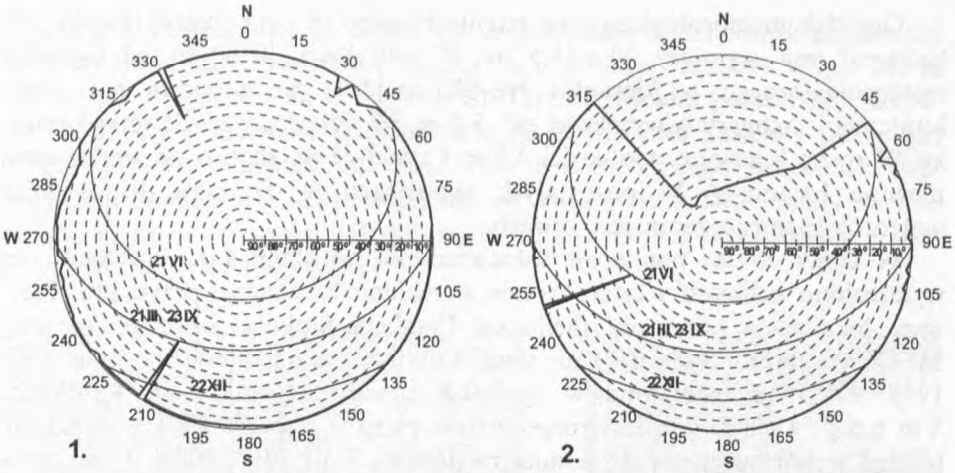
Ryc. 2.1.2. Fotografie heliografu na wieży aktynometrycznej stacji IMGW Łódź-Lublinek (wyk. A. Podstawczyńska, 2003)

Fig. 2.1.2. The photography of Campbell-Stokes heliograph on the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station (Institute of Meteorology and Water Management station) (photo by A. Podstawczyńska, 2003)

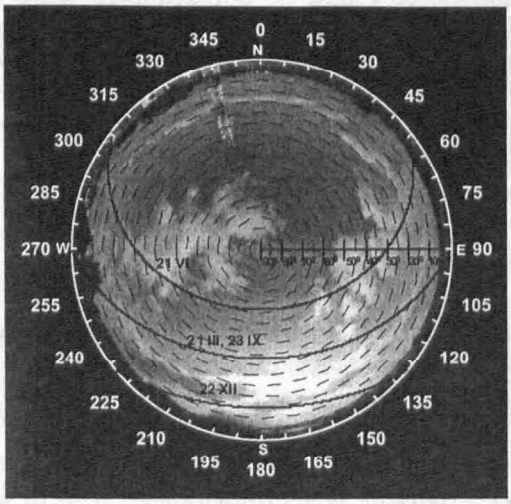
Ogródek meteorologiczny, na terenie którego obecnie zainstalowany jest heliograf, ma wymiary 20 × 15,5 m. W odległości 30–50 m od ogródka meteorologicznego w kierunku NE-SE znajdują się zabudowania portu lotniczego i hangary o wysokości ok. 5–9 m. W odległości 15–25 m w kierunku W rosną krzewy o wysokości 3,5 m i znajduje się schron na wodór oraz pawilon balonowy. W pozostałych kierunkach w stosunku do ogródka meteorologicznego teren jest otwarty.

W ciągu 50 lat pomiarów usłonecznienia na stacji Łódź-Lublinek raz wymieniono heliograf i czterokrotnie zmieniano lokalizację przyrządu. Pierwsza lokalizacja przyrządu (heliograf Cambella-Stokesa produkcji czeskiej MEOP, nr fabr. 21 006 044) na stacji Lublinek miała miejsce w dniu 1 VI 1949. Przyrząd ustawiono w ogródku meteorologicznym na wysokości 5 m n.p.g., a ciągłe pomiary rozpoczęto dopiero w styczniu 1951 r. Heliograf ten był wykorzystywany do pomiarów do dnia 7 VI 1967, kiedy to zmieniono przyrząd na nowy (ten sam producent przyrządu, nr fabr. 322 919). Heliograf ten jest używany do dziś, a z przyczyn obiektywnych kilkakrotnie uległy zmianie kule heliograficzne. Pierwsza zmiana lokalizacji przyrządu nastąpiła 14 VI 1952, kiedy to przeniesiono ogródek meteorologiczny z południowej na północną stronę lotniska, a siedziba Lotniskowej Stacji Meteorologicznej znalazła się w nowym budynku portu lotniczego, położonym o ok. 1 km od poprzedniego miejsca. Heliograf zainstalowano na dachu tego budynku, na wysokości 6 m n.p.g. Horyzont fizyczny dla przyrządu nie uległ istotnej zmianie w stosunku do poprzedniego stanowiska, a kryterium wysokości przesłonięcia horyzontu 5° – wartość progowa rejestracji czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego – zostało zachowane. Na tym stanowisku pomiarowym heliograf pozostał do 7 VI 1967 r., kiedy to przyrząd przeniesiono na wieżę aktynometryczną w ogródku meteorologicznym (wysokość 5 m n.p.g.).

Na wszystkich wymienionych tu trzech stanowiskach pomiaru usłonecznienia, jak wynika z dokumentacji stacji, przesłonięcie horyzontu dla heliografu od wschodu do zachodu Słońca nie przekraczało 5°. W listopadzie 1974 r. w okolicy ogródka meteorologicznego wykarczowano krzewy o wysokości 3,5 m rosnące w kierunku zachodnim i przeniesiono ogródek meteorologiczny ok. 40 m w kierunku zachodnim (9 XI 1974). Fakt ten nie miał istotnego wpływu na wyniki obserwacji heliograficznych. Horyzont fizyczny heliografu umieszczonego w ogródku meteorologicznym przedstawia ryc. 2.1.3. Kolejna zmiana lokalizacji heliografu nastąpiła 19 IV 1988. Przyrząd został przeniesiony z ogródka meteorologicznego o 50 m w kierunku E i zainstalowany na tarasie wieży położonej na dachu budynku Aeroklubu na wysokości 9,35 m n.p.g. Przesłonięcie horyzontu dla heliografu na tym stanowisku pomiarowym przedstawia ryc. 2.1.3. W wyniku przebudowy portu lotniczego w 1997 r. i likwidacji budynku, na którym umieszczony był



Ryc. 2.1.3. Przesłonięcie horyzontu dla heliografu na stacji Łódź-Lublinek i łuki dzienne słońca dla wybranych dni na szerokości geograficznej $\varphi = 51°44'N$: 1 – 1974, lokalizacja w ogródku meteorologicznym na wieży aktynometrycznej na wysokości 5 m n.p.g.; 2 – 1988, lokalizacja na wieży budynku aeroklubu na wysokości 9,35 m n.p.g. (wg danych Działu Służby IMGW)
Fig. 2.1.3. The horizon obstruction of the heliograph at Łódź-Lublinek station and the Sun paths in selected days on latitudes $\varphi = 51°44'N$: 1 – 1974, the location on the actinometrical tower, 5 m above the ground level; 2 – 1988, the location on the tower of Flying Club building, 9.35 m above the ground level (according to the data of Institute of Meteorology and Water Management)



Ryc. 2.1.4. Fotografia przesłonięcia horyzontu dla heliografu zlokalizowanego na wieży aktynometrycznej w ogródku meteorologicznym IMGW Łódź-Lublinek wykonana obiektywem typu „rybie oko" (wyk. A. Podstawczyńska, 2003)
Fig. 2.1.4. The "fish eye" photography of the horizon obstruction of the heliograph set on the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station (photo by A. Podstawczyńska, 2003)

heliograf, przeniesiono przyrząd do ogródka meteorologicznego na wieżę aktynometryczną, na wysokość 5 m n.p.g., gdzie pozostaje do dziś (ryc. 2.1.1., ryc. 2.1.2). Przesłonięcie horyzontu dla heliografu w 2003 r. przedstawia ryc. 2.1.4. Z analizy dokumentacji stacji wynika, iż zmiany lokalizacji heliografu, które miały miejsce w ciągu 50-letniej serii pomiarów, uwzględniały kryterium rzetelności pomiarów usłonecznienia, tj. od wschodu do zachodu horyzont był dla heliografu odkryty. Jedyny element przesłaniający horyzont stanowił słup z wiatromierzem i maszt antenowy.

Seria pomiarów usłonecznienia na stacji Łódź-Lublinek nie jest w pełni kompletna. W ciągu 50 lat pomiarów heliograficznych wystąpiły krótkie przerwy w rejestracji usłonecznienia. Pierwsza z nich przypada na okres VI–X 1952 r., kiedy to z nieznanych przyczyn zaprzestano pomiarów. W latach 1985–1989 wystąpiły przerwy o długości kilku lub kilkunastu dni spowodowane kradzieżą szklanych kul heliografu (daty kradzieży 5 V 1985, 6 V 1985, 22 III 1986, 18 VI 1986, 15 IV 1988, 6 VI 1989). Łącznie zaginęło 5 kul heliograficznych. Dane źródłowe uzupełniono w oparciu o wyniki pomiarów z sąsiednich stacji (Kalisz, Skierniewice, Błonie), minimalizując błąd sum miesięcznych i średnich wieloletnich. Popularną i zadowalającą metodą oceny jednorodności szeregu obserwacyjnego jest analiza różnic wartości mierzonych parametrów na innych stacjach i oszacowanie istotności zmian tych różnic (Pruchnicki 1987). Dla stwierdzenia jednorodności wartości usłonecznienia rejestrowanych w Łodzi w analizowanym 50-leciu i dla wykluczenia systematycznego błędu, którego przyczyną mogły być zmiany warunków pomiarów (np. zmiana lokalizacji przyrządu czy zmiana kul heliograficznych), dokonano porównania sum rocznych usłonecznienia z wartościami zarejestrowanymi na stacjach Puławy. Współczynnik korelacji danych łódzkich i puławskich dla okresu 1951–1992 wynosił 0,88 (istotny statystycznie na poziomie 1%). Podobnie duże podobieństwo w przebiegu sum rocznych usłonecznienia w analizowanym 50-leciu występuje między serią warszawską i łódzką. Szczegółowy przebieg sum rocznych usłonecznienia na stacjach Puławy i Warszawa został przedstawiony w podrozdz. 5.1. Homogeniczność 50-letniej serii sum dobowych i sum godzinnych usłonecznienia sprawdzono metodą normalizacji cech. Przyjęto, iż 50-letnia seria usłonecznienia ze stacji Łódź-Lublinek spełnia kryterium jednorodności, chociaż być może jest obarczona pewnymi niedokładnościami wynikającymi ze zmian warunków pomiarów. Zmiany te jednak nie dyskwalifikują wyników pomiarów heliograficznych wykorzystywanych w analizie wieloletnich tendencji usłonecznienia w Łodzi.

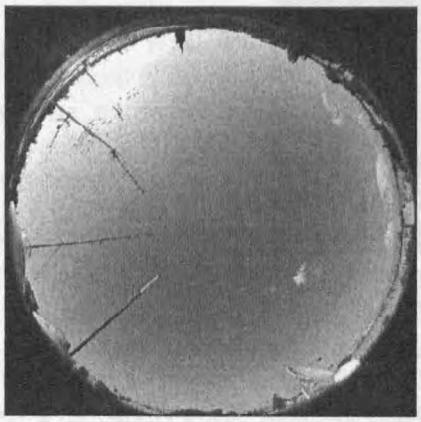
2.2. DANE AKTYNOMETRYCZNE

Bazę danych aktynometrycznych opracowania stanowiły 10-minutowe średnie wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego (bezpośrednie i rozproszone) i ultrafioletowego (UVA + UVB, bezpośrednie i rozproszone) w Wm^{-2} z lat 1997–2001 rejestrowane w centrum Łodzi przez automatyczną stację meteorologiczną Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ. Wartości te stanowiły podstawę do szczegółowej analizy dynamiki natężenia promieniowania słonecznego oraz do obliczenia dziennych, miesięcznych i rocznych sum energii w MJm^{-2}. Baza danych o promieniowaniu słonecznym została wzbogacona o wyniki pomiarów natężenia całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lublinek w okresie 10 VI – 5 VII 2002 wykonanych synchronicznie do pomiarów na stacji meteorologicznej Łódź-Lipowa (rozdz. 7.2)[1]. Ponadto w pracy wykorzystano sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego ze stacji zamiejskiej Łódź-Lublinek z lat 1991–2001. Seria pomiarowa ze stacji Łódź-Lublinek jest niepełna (brak I–VIII 1991, X 1992, IV 1995, IX–X 1996, IV–V i VII–IX 1997, 1999), ale stanowi cenny materiał źródłowy do oceny różnic w dopływie promieniowania słonecznego między centrum aglomeracji łódzkiej a obszarem peryferyjnym. Porównywalność wyników pomiarów promieniowania słonecznego na stacji śródmiejskiej i zamiejskiej zapewniła kalibracja przyrządów pomiarowych (pyranometry CM11 Kipp & Zonen) wg tego samego wzorca przez Zespół Aktynometrii Ośrodka Meteorologii IMGW.

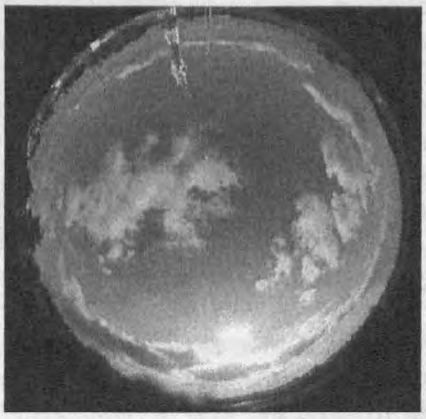
Pomiary promieniowania słonecznego w centrum aglomeracji łódzkiej wchodzą w skład systemu pomiarowego elementów meteorologicznych, prowadzonych przez automatyczną stację meteorologiczną Katedry Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Łódzkiego zlokalizowaną przy ul. Lipowej 81, w obszarze zwartej zabudowy miejskiej. Przyrządy do pomiaru promieniowania słonecznego zainstalowanie są na dachu budynku Instytutu Nauk o Ziemi UŁ (ul. Lipowa 81, 51°45′N, 19°26′E) 18 m nad poziomem ulicy, 220 m n.p.m. (ryc. 2.2.1–2.2.4). Czujniki umiejscowione są na ażurowej ławie wykonanej z metalu, na wysokości 119 cm nad powierzchnią dachu pokrytego czarną papą (ryc. 2.2.2, 2.2.3).

---

[1] Eksperymenty wykonano w ramach realizacji projektu badawczego 6 P04E 043 20, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2001–2003.



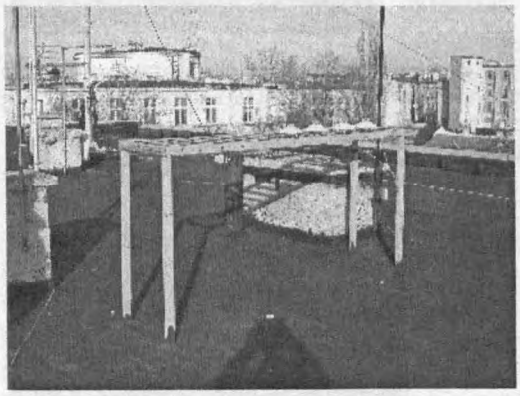
Stacja Łódź-Lipowa
Łódź-Lipowa station



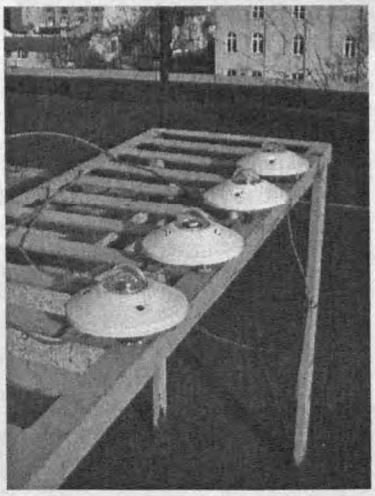
Stacja Łódź-Lublinek
Łódź-Lublinek station

Ryc. 2.2.1. Fotografia przesłonięcia horyzontu dla mierników promieniowania słonecznego wykonana obiektywem typu „rybie oko" na stacji Łódź-Lipowa i Łódź-Lublinek (wyk. A. Podstawczyńska, 2003)

Fig. 2.2.1. The "fish eye" photographs of the horizon obstruction of the solar radiation meters at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations (photo by A. Podstawczyńska, 2003)

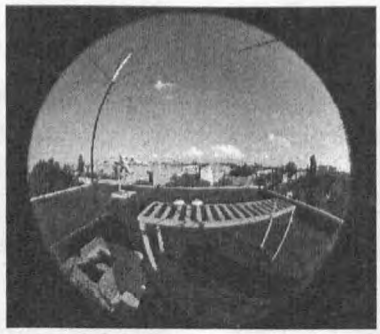


widok w kierunku NE
view in direction NE



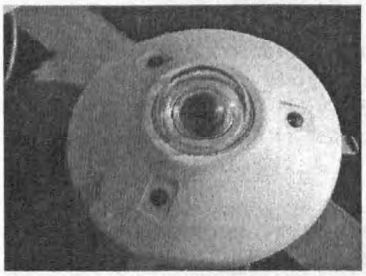
Ryc. 2.2.2. Lokalizacja mierników promieniowania słonecznego na dachu budynku Instytutu Nauk o Ziemi UŁ przy ul. Lipowej 81 w Łodzi

Fig. 2.2.2. The location of the solar radiation meters on the roof of the Institute of the Earth Science's building at Lipowa 81 street in Łódź

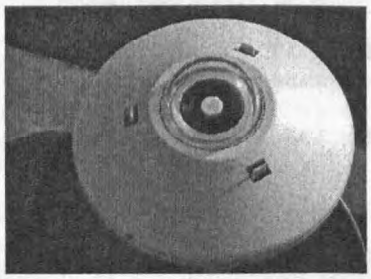


widok w kierunku S
view in direction S

Ryc. 2.2.3. Ażurowa ława z miernikami promieniowania słonecznego na dachu budynku Instytutu Nauk o Ziemi UŁ przy ul. Lipowej 81 i jej otoczenie w obiektywie „rybie oko"
Fig. 2.2.3. The "fish eye" photography of the openwork bench with solar radiation meters and its surroundings on the roof of the Institute of the Earth Science's building at Lipowa 81 street

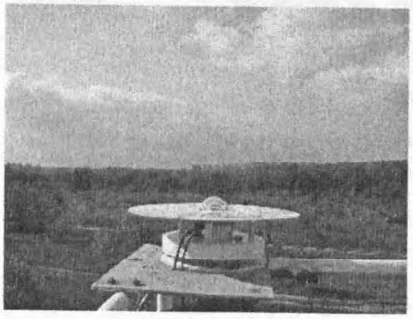


CM 11

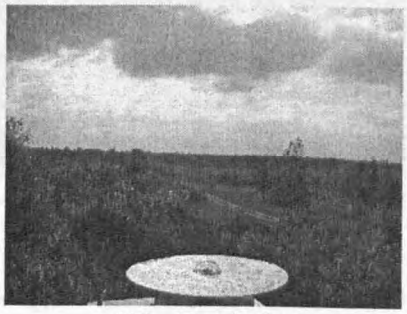


CUV3

Ryc. 2.2.4. Mierniki całkowitego promieniowania słonecznego (CM11) i ultrafioletu (CUV3) firmy Kipp & Zonen na stacji Łódź-Lipowa
Fig. 2.2.4. The meters of total solar radiation (CM11) and ultraviolet radiation (CUV3) by Kipp & Zonen at Łódź-Lipowa station



widok w kierunku SW
view in direction SW



widok w kierunku S
view in direction S

Ryc. 2.2.5. Pyranometr CM11 na wieży aktynometrycznej stacji IMGW Łódź-Lublinek
Fig. 2.2.5. Pyranometer CM11 on the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station

Pomiary rozpoczęto 1 I 1997 r. Przyrządem pomiarowym całkowitego promieniowania słonecznego jest pyranometr CM11 firmy Kipp & Zonen (ryc. 2.2.4). Wartości natężenia promieniowania całkowitego w Wm^{-2} są próbkowane z dużą częstotliwością, co 10 sek. Dziesięciominutowe średnie wartości natężenia promieniowania są zapisywane w stałej pamięci rejestratora firmy Cambell typ 21 X. Pyranometr CM11 wg klasyfikacji Światowej Organizacji Meteorologicznej jest miernikiem drugiego standardu. Dla tej klasy przyrządu stabilność czujnika oszacowano na +/– 0,5% w skali roku. Wartość natężenia promieniowania jest mierzona z dokładnością +/– 1 Wm^{-2}. Czułość widmowa pyranometru przy średnim zakresie rejestrowanego promieniowania słonecznego 305–2800 nm wynosi +/– 1%.

Pomiary promieniowania ultrafioletowego są wykonywane miernikiem CUV3 firmy Kipp & Zonen (ryc. 2.2.4). Podobnie jak w przypadku promieniowania całkowitego, wartości natężenia ultrafioletu w Wm^{-2} są próbkowane co 10 sek., 10-minutowe średnie są zapisywane przez Data Logger firmy Cambell typ 21 X. Czułość widmowa miernika CUV3 wynosi od 290 nm do 400 nm, przy czym dominującym pasmem rejestrowanym przez miernik, wynikającym z właściwości filtrów zastosowanych przez producenta oraz procesów ekstynkcji promieniowania UV (szczególnie UVB, 280–320 nm) w atmosferze, jest zakres promieniowania powyżej 306 nm. Z tej przyczyny rejestrowane dane nie mogą być przedmiotem analizy w aspekcie natężenia promieniowania erytemalnego UVB, szczególnie w obszarach miejskich, gdzie niebagatelną rolę w osłabieniu natężenia ultrafioletu B odgrywają przypowierzchniowe zanieczyszczenia powietrza, np. dwutlenek siarki. Przyrząd CUV3 przystosowany jest do pomiaru natężenia promieniowania w zakresie 0,01–99,99 Wm^{-2}.

Ciągłe pomiary natężenia całkowitego promieniowania słonecznego na stacji IMGW Łódź-Lublinek (51°43'N, 19°24'E) rozpoczęto we wrześniu 1991 r. Pyranometr zainstalowano w ogródku meteorologicznym na wieży aktynometrycznej, na wysokości 5 m n.p.g. Rys topograficzny stacji, lokalizację ogródka meteorologicznego i opis jego otoczenia przedstawiono w podrozdz. 2.1. Przesłonięcie horyzontu dla pyranometru w 2003 r. przedstawia ryc. 2.2.1. Zespół Aktynometrii w Ośrodku Meteorologii IMGW sprawował kontrolę merytoryczną wyników pomiarów promieniowania całkowitego na stacji Łódź-Lublinek, dokonując weryfikacji danych przed włączaniem ich do Bazy Danych Aktynometrycznych. Braki danych w serii pomiarowej całkowitego promieniowania słonecznego wynikały głównie z awarii rejestratora.

Pomiary promieniowania słonecznego dokonywane opisywanymi przyrządami mogą być obarczone błędem wynikającym z wpływu czynników atmosferycznych, a także z nieprawidłowej konserwacji przyrządów. Do najczęstszych przyczyn błędów pomiarowych należy zaliczyć pojawienie się

rosy, szronu, powłoki lodowej czy mokrego śniegu na powierzchni szklanych kopuł. Osady powstałe w czasie bezwietrznej i bezchmurnej pogody mogą utrzymywać się na kopułach przyrządów do kilku godzin. Szczególnym dyfuzorem dla promieniowania słonecznego jest powłoka lodowa powstała na kopule przyrządu. Według producenta, może ona powodować wzrost natężenia promieniowania do 50% w pierwszych godzinach po wschodzie Słońca. W celu eliminacji tych zjawisk producent zaleca montaż wentylatora zapobiegającemu spadkowi temperatury poniżej punktu rosy. Firma Kipp & Zonen oferuje wentylator CV1 zapewniający laminarny przepływ powietrza wokół kopuły przyrządu. Opisywane przyrządy pomiarowe zainstalowane na stacji Łódź-Lipowa nie są wyposażone w ten dodatkowy element, podobnie jak stacja IMGW Łódź-Lublinek i inne stacje meteorologiczne w Polsce. W instrukcjach obsługi i konserwacji mierników zalecane jest czyszczenie zewnętrznej szklanej kopuły codziennie (pyranometr CM11) lub cotygodniowo (miernik CUV3). Stan sanitarny powietrza w Łodzi z początkiem lat 90. ulega stopniowej poprawie w wyniku restrukturyzacji przemysłu w Łodzi i regionie oraz redukcji głównych emiterów zanieczyszczeń. W sezonie grzewczym, trwającym przeciętnie od października do końca marca, w niektórych rejonach Łodzi notuje się zwiększone zapylenie atmosfery w wyniku emisji zanieczyszczeń powstałych przez spalanie węgla w domowych systemach grzewczych. To zjawisko jest obserwowane w centrum miasta, w obszarach starej, zwartej zabudowy miejskiej, a więc dotyczy najbliższego otoczenia stacji meteorologicznej przy ul. Lipowej 81. Z tego względu czyszczenie kopuł mierników promieniowania słonecznego w sezonie zimowym ma szczególne znaczenie. W celu zachowania porównywalności wyników konserwacja przyrządów na stacji Łódź-Lipowa jest prowadzona podobnie jak na stacji IMGW Łódź-Lublinek.

3. METODA OPRACOWANIA

3.1. TERMINOLOGIA I SYMBOLE ZASTOSOWANE W OPRACOWANIU

W opracowaniu wykorzystano nazewnictwo powszechnie stosowane w polskiej literaturze klimatologicznej. W charakterystyce usłonecznienia posługiwano się pojęciem usłonecznienia rzeczywistego i względnego. Usłonecznienie rzeczywiste (ang. *actual sunshine duration*) jest to czas wyrażony w godzinach lub minutach, w którym tarcza słoneczna nie jest przesłonięta przez chmury i rejestrowany jest dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego. Usłonecznienie względne (ang. *relative sunshine duration*) jest to stosunek usłonecznienia rzeczywistego do usłonecznienia możliwego wyrażony w procentach. Za usłonecznienie możliwe w prezentowanym opracowaniu przyjęto usłonecznienie astronomicznie możliwe, tj. długość astronomiczną dnia wyznaczoną na podstawie *Tablic słonecznych...* (1976). Ponadto w charakterystyce usłonecznienia posługiwano się takimi pojęciami, jak: dzień bezsłoneczny, rozumiany jako dzień bez dopływu promieniowania bezpośredniego, dzień pochmurny, tj. dzień z usłonecznieniem mniejszym lub równym 25% możliwego, dzień umiarkowanie słoneczny, tj. dzień z usłonecznieniem w przedziale 25,1–50% możliwego, dzień słoneczny, tj. dzień z usłonecznieniem w przedziale 50–75% możliwego, dzień bardzo słoneczny, tj. dzień z usłonecznieniem powyżej 75% możliwego.

Z zakresu aktynometrii stosowano podstawowe terminy, m.in. „całkowite promieniowanie słoneczne", rozumiane jako suma bezpośredniego i rozproszonego promieniowania słonecznego rejestrowana na powierzchni horyzontalnej, „ultrafioletowe promieniowanie słoneczne" – w tym opracowaniu termin ten odnosi się do całkowitego ultrafioletu, tj. sumy bezpośredniego i rozproszonego promieniowania słonecznego w paśmie UVA + UVB rejestrowanego na powierzchni horyzontalnej, „sumy energii promieniowania słonecznego" w przedziałach godzinnych, dobowych, miesięcznych i rocznych, „natężenie promieniowania słonecznego", w tym opracowaniu przedstawiane głównie jako średni strumień energii na powierzchni horyzontalnej w przedziale 10-minutowym. W opracowaniu nie używano dyskusyjnego w polskiej

nomenklaturze pojęcia napromieniowania – wartości energii promieniowania słonecznego na powierzchni horyzontalnej – tak powszechnego w literaturze anglojęzycznej (ang. *irradiance*, *irradiation*). Ponadto posługiwano się, obok danych aktynometrycznych wyrażonych w jednostkach bezwzględnych, także zrelatywizowaną postacią sum energii promieniowania słonecznego nazywaną w polskiej literaturze klimatologicznej globalnym współczynnikiem transmisji (Bogdańska, Podogrocki 2000), transmisją globalną atmosfery lub transmisją promieniowania słonecznego w atmosferze (Dubicka 1979, 1994; Bryś 1994). W literaturze anglojęzycznej transmisja globalna atmosfery to *clearness index* (Liu, Jordan 1960, Coppolino 1994) lub *relative global radiation* (De Bruin i in. 1995). Pojęcie to definiowane jest jako stosunek natężenia lub sum energii rejestrowanych na płaszczyźnie horyzontalnej, przy powierzchni ziemi (dobowych, miesięcznych, rocznych) do wartości na górnej granicy atmosfery na powierzchni horyzontalnej wyrażony w częściach jedności lub procentach. Współczynnik ten, opisując warunki dopływu promieniowania słonecznego przy istniejącym zachmurzeniu i przezroczystości atmosfery, pozwala na ogólną ocenę osłabienia promieniowania w atmosferze. Przykładami prac polskich autorów, w których wykorzystano zrelatywizowane wartości całkowitego promieniowania słonecznego w aspekcie zmienności wieloletniej, są opracowania dotyczące klimatu Wrocławia autorstwa m.in. M. Dubickiej (1994) oraz K. Bryś (1994). W literaturze zagranicznej przykładem analizy wieloletniej zmienności całkowitego promieniowania słonecznego (65-lecie 1928–1992) z wykorzystaniem względnych wartości promieniowania jest praca dotycząca Wageningen w Holandii (51°58'N, 5°39'E) (De Bruin i in. 1995).

W prezentowanym opracowaniu transmisję globalną atmosfery wyrażono w procentach i wyznaczono dla promieniowania całkowitego, a także dla promieniowania UV (opis procedury obliczeniowej przedstawiono w rozdz. 3.2). Wartości transmisji promieniowania słonecznego wykorzystano do oceny ogólnej ekstynkcji promieniowania słonecznego w atmosferze w Łodzi w latach 1997–2001 (rozdz. 6) oraz w formule empirycznej Blacka do wyznaczania wartości całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na podstawie usłonecznienia (rozdz. 8).

Wykaz zastosowanych symboli

Lp.	Symbol	Opis	Wymiar
1	I_t	Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego	Wm^{-2}
2	I_{uv}	Natężenie ultrafioletowego promieniowania słonecznego	Wm^{-2}
3	I_{t0}	Stała słoneczna	Wm^{-2}
4	I_{uv0}	Stała słoneczna w ultrafioletowej części widma promieniowania słonecznego	Wm^{-2}
5	$I_{t0\ h}$	Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery na powierzchni horyzontalnej	Wm^{-2}
6	$I_{uv0\ h}$	Natężenie ultrafioletowego promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery na powierzchni horyzontalnej	Wm^{-2}
7	M_t, D_t, H_t	Miesięczne, dzienne, godzinne sumy energii całkowitego promieniowania słonecznego	MJm^{-2}
8	M_{uv}, D_{uv}, H_{uv}	Miesięczne, dzienne, godzinne sumy energii ultrafioletowego promieniowania słonecznego	MJm^{-2}
9	$R_{uv/t}$	Udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym	%
10	T_t	Transmisja całkowitego promieniowania słonecznego w atmosferze	%
11	T_{uv}	Transmisja ultrafioletowego promieniowania słonecznego w atmosferze	%
12	H_s	Wysokość Słońca nad horyzontem	°
13	φ	Szerokość geograficzna	°
14	λ	Długość geograficzna	°
15	δ	Deklinacja Słońca	–
16	m	Masa optyczna atmosfery	–
17	a, b	Współczynniki regresji liniowej	–
18	$Sig\ a$, $Sig\ b$	Błędy estymacji współczynników regresji	–
19	Sig_e	Błąd standardowy estymacji modelu regresji liniowej	–
20	R	Współczynnik korelacji liniowej	–
21	R^2	Współczynnik determinacji	–

3.2. METODY ANALIZY DANYCH HELIOGRAFICZNYCH

Dane heliograficzne ze stacji Łódź-Lublinek z okresu 1951–2000 uznano za homogeniczne na podstawie wyników analizy jednorodności serii pomiarowej metodą normalizacji cech oraz nieparametrycznym testem Mann-Kendalla w wersji sekwencyjnej. Badając reprezentatywność serii usłonecznienia, przeanalizowano również historię pomiarów heliograficznych na stacji IMGW Łódź-Lublinek pod względem czynników determinujących jakość danych, m.in. heliografu i jego lokalizacji, kontroli czułości pasków heliograficznych, sposobu ich opracowania, bieżącej weryfikacji wyników pomiarów. Stwierdzono, iż w analizowanym wieloleciu kryterium rzetelności pomiarów heliograficznych na stacji Łódź-Lublinek zostało zachowane.

Obliczono sumy miesięczne, sezonowe i roczne usłonecznienia rzeczywistego i względnego oraz ich podstawowe charakterystyki statystyczne, m.in. miary średnie, miary dyspersji, tj. zakres wahań, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, miarę asymetrii, tj. współczynnik asymetrii oraz miarę spłaszczenia rozkładu, tj. współczynnik kurtozy, a także obliczono frekwencję usłonecznienia. Zaprezentowano cechy struktury usłonecznienia, wykorzystując dobowe wartości usłonecznienia względnego w przedziałach co 10% oraz w pięciu klasach usłonecznienia możliwego. Pogrupowano dni według następujących wartości usłonecznienia względnego: 0% – dni bezsłoneczne, 0,1–25% – dni pochmurne, 25,1–50% – dni umiarkowanie słoneczne, 50,1–75% – dni słoneczne, > 75% – dni bardzo słoneczne. Przedstawiona klasyfikacja strukturalna usłonecznienia powstała jako rozwinięcie i pośrednio jako kontynuacja podziału zaproponowanego przez K. Fortuniaka (1994), który w analizie wieloletniej cech strukturalnych usłonecznienia w Łodzi wydzielił trzy grupy dni, tj. bardzo słoneczne z usłonecznieniem względnym powyżej 75%, umiarkowanie słoneczne z usłonecznieniem względnym w przedziale 25–75%, pochmurne z usłonecznieniem względnym poniżej 25%. W tym opracowaniu klasę dni umiarkowanie słonecznych podaną przez K. Fortuniaka podzielono na dwie klasy o następujących przedziałach usłonecznienia względnego: 25,1–50% – dni umiarkowanie słoneczne, 50,1–75% – dni słoneczne. Uzasadnieniem przyjęcia dość niskiego (75%) kryterium dla grupy dni bardzo słonecznych jest metoda wyznaczania usłonecznienia względnego w oparciu o astronomiczną długość dnia. Metoda ta nie uwzględnia realnego skrócenia czasu dopływu promieniowania bezpośredniego do heliografu względem wschodu i zachodu Słońca. Z tego względu, gdyby za dni bardzo słoneczne przyjąć dni z najwyższym przedziałem usłonecznienia względnego, tj. powyżej 90%, wówczas zaklasyfikowałyby się tylko nieliczne przypadki. Uzupełnieniem cech struktury usłonecznienia było wyznaczenie w analizowanym 50-leciu frekwencji co najmniej 5-dniowych

okresów zwartych dni bezsłonecznych oraz analiza udziału dni z usłonecznieniem powyżej średniej dla danego miesiąca, pory roku i roku.

Do analizy wieloletniej zmienności i wyznaczenia trendów w szeregach charakterystyk usłonecznienia zastosowano metodę regresji liniowej, gdzie ocenę trendu przeprowadzono przy zastosowaniu testu istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona (t-Studenta). Siłę tendencji wyrażono współczynnikiem regresji. Tendencje i trendy czasowej zmienności usłonecznienia przeanalizowano również, stosując nieparametryczny test Mann-Kendalla w wersji sekwencyjnej. Test Mann-Kendalla jest poglądowym narzędziem w analizie szeregów czasowych, a wykres bezwzględnych wartości statystyki testu u wyznaczonych progresywnie, tj. od początku serii i regresywnie, tj. od końca badanej serii pozwala na szeroką interpretację wyników (Sneyers 1963; Gerstengarbe, Werner 1999). Ogólny przebieg statystyki progresywnej testu jest zbieżny z przebiegiem średniej ruchomej wartości zmiennej. Analiza przebiegu wartości statystyki sekwencyjnego testu Mann-Kendalla (Gerstengarbe, Werner 1999) umożliwia:

– wykrycie trendu dla całej serii obserwacyjnej i ocenę jego istotności (na istotność statystyczną będą wskazywać wartości statystyki wyższe od wartości krytycznej, tj. 1,96 na poziomie istotności 0,05),

– ocenę siły tendencji w poszczególnych podokresach analizowanego szeregu czasowego,

– zlokalizowanie w czasie początku nieciągłości w szeregu czasowym, na podstawie przecięcia krzywych przebiegu statystyki testu progresywnej i regresywnej w punkcie o wartości wyższej od poziomu krytycznego,

– zlokalizowanie w czasie początku nieciągłości serii na podstawie wykrycia nagłej zmiany wartości statystyki progresywnej przewyższającej poziom krytyczny testu.

Wersja sekwencyjna testu Mann-Kendalla została zastosowana przez R. Sneyersa (1963), F. W. Gerstengarbe i P. C. Werner (1999), a w Polsce m.in. przez H. Mitoska (1995), H. Mitoska, U. Strupczewskiego (1996), B. Głowickiego (1999), J. Wibig (2001).

Pierwszym etapem procedury wyznaczania wartości statystyki w sekwencyjnej wersji testu Mann-Kendalla jest obliczenie dla każdego elementu i analizowanego szeregu liczby k_i oznaczającej, ile z wyrazów poprzedzających i-ty jest od niego mniejszych. Statystyką standardowego testu Mann-Kendalla jest suma liczb k_i

$$a = \sum_{i=2}^{n} k_i.$$

Mann wykazał (1945), że dla $N > 10$ a ma rozkład zbliżony do normalnego $N(\mu, \sigma)$ o wartości oczekiwanej

$$\mu = \frac{n(n-1)}{4}$$

i wariancji

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)\ (2n+5)}{72}.$$

Zmienna losowa u wyrażona jest wzorem

$$u = \frac{a-\mu}{\sqrt{\sigma^2}}$$

i ma rozkład normalny N(0,1) o wartości oczekiwanej 0 i wariancji 1.

W wersji sekwencyjnej testu Mann-Kendalla należy wyznaczyć szereg progresywny wartości u_p dla podszeregu złożonego z elementów od początku do końca serii $(x_1,\ldots\ x_n)$ i szereg regresywny wartości u_r dla podszeregu złożonego z elementów od końca do początku serii $(x_n,\ldots\ x_1)$. Na czas wystąpienia nieciągłości w badanym szeregu wskazuje punkt przecięcia krzywych przebiegu u_p *i* u_r. *Punkt przecięcia* $s\ (t_i)$ w czasie t_i wyznacza się w następujący sposób (Gerstengarbe, Werner 1999):

$s\ (t_i) = t_i$ jeżeli $u_p\ (t_{i-1}) > u_r\ (t_{i-1});\ u_p\ (t_i) \leqslant u_r\ (t_i)$
lub $u_p\ (t_{i-1}) < u_r\ (t_{i-1});\ u_p\ (t_i) \geqslant u_r\ (t_i)$
$s\ (t_i) = 0$ w innym przypadku.

W przedstawionym opracowaniu oprócz analizy trendów charakterystyk usłonecznienia podjęto próbę poszukiwań periodyczności w szeregach 50-elementowych sum miesięcznych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego oraz w 50-letnim szeregu dobowych wartości usłonecznienia względnego (szereg złożony z 18 250 liczb). Do wykrycia zmienności usłonecznienia o charakterze okresowym zastosowano klasyczną metodę Blackmana-Tukeya (1959), w której do wyznaczenia spektrum mocy, $P(f)$, stosuje się transformatę Fouriera funkcji autokowariancyjnej z wygładzeniem przy pomocy funkcji wagowej:

$$P(f) = 2\left[c_0 + 2\sum_{k=1}^{N-1} c_k w_k \cos(2\pi f k)\right],$$

gdzie:

$$c_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2,$$

$$c_k = \frac{1}{N-k}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})\ (x_{i-k}-\bar{x}),$$

$$w_k = \begin{cases} 0{,}5[1+\cos(\pi k/M)] & \text{dla } |k| \leqslant M \\ 0 & \text{dla } |k| > M \end{cases}$$ (okno funkcji wagowej Tukeya),

$i = 1 \ldots N$ – długość szeregu danych,
$k = 1 \ldots M$ – szerokość okna funkcji wagowej.

Wartości c_k oznaczają kolejne elementy funkcji autokowariancyjnej, a w_k jest funkcją wagową zaproponowaną przez Tukeya. Wartości spektrum obliczono, przyjmując szerokość okna wagowego równą połowie długości ciągu ($M = N/2$). Dla oceny statystycznej istotności maksimów w analizowanym spektrum mocy przyjęto hipotezę zerową o równości spektrum teoretycznego i empirycznego. Za spektrum teoretyczne przyjęto tzw. biały szum, czyli spektrum prostokątne świadczące o całkowitej przypadkowości odchyleń. Biały szum estymowano średnią wartością spektrum empirycznego, $P(f)$. Funkcja spektralna (spektrum mocy) prezentująca, jaka część wariancji szeregu opisywana jest przez wahania o danej częstości f (Kożuchowski 1990) – ma rozkład χ^2 podzielony przez liczbę stopni swobody, ν. Granice ufności określono, mnożąc teoretyczne wartości spektrum przez wartość krytyczną rozkładu $\chi^{2/\nu}$, dla założonego poziomu istotności 0,05. Liczba stopni swobody dla okna wagowego Tukeya wyrażona jest wzorem $8N/3M$, gdzie N oznacza liczebność szeregu, M szerokość okna wagowego (Fortuniak 1999, 2000a).

W analizie szeregu wartości dobowych usłonecznienia względnego dokonano eliminacji cyklu rocznego, przekształcając szereg wartości empirycznych w szereg wartości zredukowanych (Fortuniak 2000b):

$$\check{S}(t_i) = s(t_i) / \hat{s}(t_i),$$

gdzie:

$s(t_i)$ – empiryczne wartości usłonecznienia,

$\hat{s}(t_i)$ – teoretyczne wartości usłonecznienia zdefiniowane sinusoidą o okresie 365 dni o parametrach wyznaczonych analizą Fouriera (równanie definiujące te wartości zamieszczono poniżej),

$\check{S}(t_i)$ – wartości zredukowane wykorzystane do poszukiwań periodyczności opisaną metodą Blackmana-Tukeya.

Model rocznego przebiegu usłonecznienia względnego (sinusoida 365-dniowa) określony jest następującym równaniem (Fortuniak 2000b):

$$\tilde{x}(t) = A_0 + A_1 \cos(2\pi f_1 t_i) + B_1 \sin(2\pi f_1 t_i).$$

Współczynniki A_0, A_1, B_1 obliczono, stosując następujące wzory:

$$A_0 = \bar{x},$$

$$A_1 = \frac{2}{n}\sum_i x(t_i)\cos(2\pi f_1 t_i),$$

$$B_1 = \frac{2}{n}\sum_i x(t_i)\sin(2\pi f_1 t_i),$$

gdzie:

$x\ (t_i)$ – wartości usłonecznienia dla kolejnych dni badanego okresu,

$f_1 = 50\ /\ 18\ 250$ – częstość odpowiadająca 50 harmonice Fouriera.

Sinusoida o okresie 365 dni jako model cykliczności rocznej usłonecznienia została wykorzystana do wyeliminowania tej periodyczności z szeregu dobowych wartości usłonecznienia względnego.

Analizę i wizualizację danych na potrzeby tego opracowania wykonano przy wykorzystaniu programów komputerowych, m.in. Origin wersja 7.0, Grapher wersja 4.0, Surpher wersja 8.0.

3.3. METODY ANALIZY DANYCH AKTYNOMETRYCZNYCH

Materiał aktynometryczny, m.in. 10-minutowe średnie wartości natężenia ultrafioletowego (290–400 nm) i całkowitego (305–2800 nm) promieniowania słonecznego z punktu pomiarowego Łódź-Lipowa oraz sumy godzinne promieniowania całkowitego ze stacji Łódź-Lublinek, został zweryfikowany poprzez kontrolę współczynników kalibracji przyrządów pomiarowych, analizę zgodności uzyskanych wartości z warunkami astronomicznymi ze szczególnym uwzględnieniem wartości skrajnych (test transmisji), analizę stosunku wartości promieniowania UV i całkowitego promieniowania słonecznego. Stwierdzono homogeniczność wyników serii pomiarów całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w Łodzi. Wyjściowe dane aktynometryczne (10-minutowe wartości natężenia promieniowania całkowitego i UV na stacji Łódź-Lipowa w Wm^{-2}, sumy godzinne promieniowania całkowitego w Jcm^{-2} na stacji Łódź-Lublinek) stanowiły podstawę obliczenia podstawowych charakterystyk klimatologicznych promieniowania słonecznego, tj. średnich rocznych, miesięcznych, dobowych sum energii wyrażonych w MJm^{-2}. Dla szerokości geograficznej Łodzi obliczono wartości natężenia ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego w interwale 10-minutowym oraz dobowe, miesięczne i roczne sumy energii słonecznej przypada-

jące na powierzchnię horyzontalną na górnej granicy atmosfery. Obliczenia wykonano, przyjmując następujące wartości stałej słonecznej: 1365 Wm^{-2} dla całkowitego promieniowania słonecznego (wg. danych NOAA National Geophysical Data Center) oraz 108 Wm^{-2} dla ultrafioletowego promieniowania słonecznego w zakresie 290–400 nm (tj. 7,915% stałej słonecznej całkowitego promieniowania krótkofalowego Słońca) (Thekaekara 1971). Wartości natężenia wymienionych parametrów na powierzchni horyzontalnej na górnej granicy atmosfery obliczono wg następującej formuły (*Tablice słoneczne...* 1976):

$$I_{t0h} = I_{t0}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \sin H_s,$$

$$I_{uv0h} = I_{uv0}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \sin H_s,$$

gdzie:

I_{t0} – stała słoneczna,

I_{uv0} – stała słoneczna dla ultrafioletu,

$\left(\frac{r_0}{r}\right)^2$ – współczynnik odległości Ziemia Słońce,

H_s – wysokość Słońca nad horyzontem, którą obliczono wg formuły (*Tablice słoneczne...* 1976):

$$\sin H_s = \sin\varphi \cdot \sin\delta + h_s \cdot \cos\delta \cdot \cos\theta,$$

w którym:

θ – kąt godzinny,

φ – szerokość geograficzna,

δ – deklinacja Słońca obliczona wg formuły Spencera (1971):

$$\delta = 0{,}006918 - 0{,}399912 \cdot \cos(\theta_0) + 0{,}070257 \cdot \sin(\theta_0) - \\ - 0{,}006758 \cdot \cos(2\theta_0) + 0{,}000907 \cdot \sin(2\theta_0) - \\ - 0{,}002697 \cdot \cos(3\theta_0) + 0{,}00148 \cdot \sin(3\theta_0),$$

gdzie:

$\theta_0 = 2\pi \cdot nd/356$,

nd – numer dnia w roku (0 – 1 stycznia, ..., 364 – 31 grudnia).

Wyznaczone wartości promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery zostały wykorzystane do obliczenia współczynnika globalnej

transmisji atmosfery dla całkowitego (T_t) i ultrafioletowego (T_{uv}) promieniowania słonecznego wyrażonego w procentach jako iloraz mierzonych wartości promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa i obliczonych wartości promieniowania słonecznego dla górnej granicy atmosfery na szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa.

Masa optyczna atmosfery została obliczona wg formuły Kastena (1966):

$$m = [\sin h_s + 0{,}15(3{,}855 + h_s)^{-1{,}253}]^{-1}.$$

Obliczono podstawowe charakterystyki statystyczne szeregów danych aktynometrycznych, m.in. miary średnie, miary dyspersji, tj. zakres wahań, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności. Obliczono miary asymetrii, tj. współczynnik asymetrii, współczynnik kurtozy. Wyznaczono frekwencję poszczególnych klas wartości sum energii promieniowania słonecznego oraz kwartyle. Związek promieniowania ultrafioletowego z promieniowaniem całkowitym opisano modelem regresji liniowej, wyznaczono współczynniki równania regresji, błędy standardowe estymacji, obliczono współczynnik korelacji i determinacji. W badaniach związku usłonecznienia z całkowitym i ultrafioletowym promieniowaniem słonecznym wyznaczono dla Łodzi współczynniki regresji do wzoru Blacka. Szerzej ten problem przedstawiono w rozdz. 8.

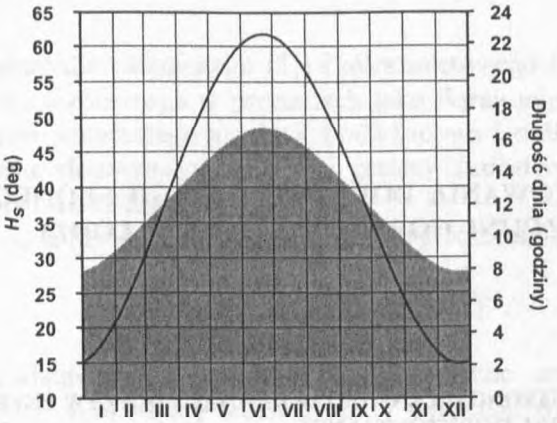
W analizie wieloletniej zmienności sum dobowych ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego podjęto próbę poszukiwań cykliczności w szeregach danych. Zastosowano, podobnie jak w przypadku charakterystyk usłonecznienia, metodę Blackmana-Tukeya, a cykl zmienności rocznej w szeregach czasowych promieniowania całkowitego i UV wykluczono przy zastosowaniu modelu sinusoidy o okresie 365 dni, której parametry wyznaczono analizą Fouriera. Szczegółowy opis procedury obliczeniowej przedstawiono w rozdziale 3.2. Liczebność 5-letniej serii danych (promieniowanie całkowite i UV ze stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001) wykorzystanych do badania cykliczności wynosiła 1850 i dla tej liczebności szeregu częstość odpowiadająca 50 harmonice Fouriera wynosiła $f1 = 50/1850$.

4. UWARUNKOWANIA DOPŁYWU ENERGII SŁONECZNEJ DO POWIERZCHNI HORYZONTALNEJ W ŁODZI

4.1. CZYNNIKI ASTRONOMICZNE DETERMINUJĄCE DOPŁYW ENERGII SŁONECZNEJ DO POWIERZCHNI HORYZONTALNEJ

Ruch Ziemi wokół własnej osi i wokół Słońca powoduje zmiany warunków astronomicznych w ciągu roku i w ciągu doby. Zmiana wysokości Słońca nad horyzontem i długości dnia jest czynnikiem o pierwszorzędnym znaczeniu dla ilości energii słonecznej otrzymywanej przez powierzchnię czynną. Od kąta padania promieni słonecznych zależy długość drogi strumienia energii w atmosferze (masa optyczna atmosfery), w czasie której podlega on osłabieniu w wyniku rozpraszania i absorpcji. Wysokość Słońca nad horyzontem w południe na szerokości geograficznej Łodzi zmienia się w ciągu roku od 14,7° w grudniu do 61,7° w czerwcu. Masa optyczna atmosfery w Łodzi wyznaczona wg formuły Kastena (1966) zmienia się od 22 dla 1° wysokości Słońca nad horyzontem do 1,1 dla 61,7° wysokości Słońca nad horyzontem (tab. 4.1.1). Długość dnia w Łodzi zmienia się od 7,8 godz. w grudniu do 16,7 godz. w czerwcu (ryc. 4.1.1). Natężenie promieniowania całkowitego na powierzchni horyzontalnej na górnej granicy atmosfery dla szerokości geograficznej Łodzi dla najwyższej kulminacji słońca, tj. 61,7° wynosi 1241,5 Wm^{-2}. Natężenie ultrafioletowego promieniowania słonecznego w zakresie 290–400 nm (UVA + UVB) wynosi 98,2 Wm^{-2}, co stanowi 7,9% promieniowania całkowitego notowanego na górnej granicy atmosfery (tab. 4.1.2). Dobowa suma energii promieniowania całkowitego 15 czerwca na granicy atmosfery wynosi 44,3 MJm^{-2}, a promieniowania UV – 3,5 MJm^{-2}. Dobowa suma energii promieniowania całkowitego 15 stycznia wynosi 7,4 MJm^{-2}, a promieniowania UV – 0,6 MJm^{-2}.

Ilość energii słonecznej rejestrowana przy powierzchni Ziemi jest wypadkową warunków astronomicznych oraz stanu atmosfery kształtowanego przez czynniki pogodowe i antropogeniczne. Różnice między wartościami promieniowania słonecznego (natężeniem czy sumami energii) dla górnej granicy atmosfery a wartościami przy powierzchni Ziemi uwidaczniają modyfikujący wpływ atmosfery.



Ryc. 4.1.1. Przebieg roczny kulminacji słońca nad horyzontem (H_s) i długość dnia dla szerokości geograficznej Łodzi

Fig. 4.1.1. Annual course of the solar zenith angle and the days length on the latitude of Łódź

Tabela 4.1.1. Masa optyczna atmosfery wg formuły Kastena (1966) w poszczególnych przedziałach wysokości Słońca nad horyzontem (H_s)

Table 4.1.1. Optical air masses by Kasten formula (1966) in particular intervals of the Sun height above horizon (H_s)

H_s	1–5°	5,1–10°	10,1–15°	15,1–20°	20,1–30°	30,1–40°	40,1–50°	50,1–61,7°
Masa optyczna	22,0–8,8	8,6–5,1	5,0–3,5	3,5–2,7	2,7–2,0	1,9–1,5	1,5–1,3	1,3–1,1

Tabela 4.1.2. Kulminacja Słońca nad horyzontem (H_s), długość dnia (D_L), natężenie i suma dobowa całkowitego (I_{t0h}, D_{t0h}) *i ultrafioletowego* (UVA + UVB, I_{uv0h}, D_{uv0h}) promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery dla 15. dnia miesiąca

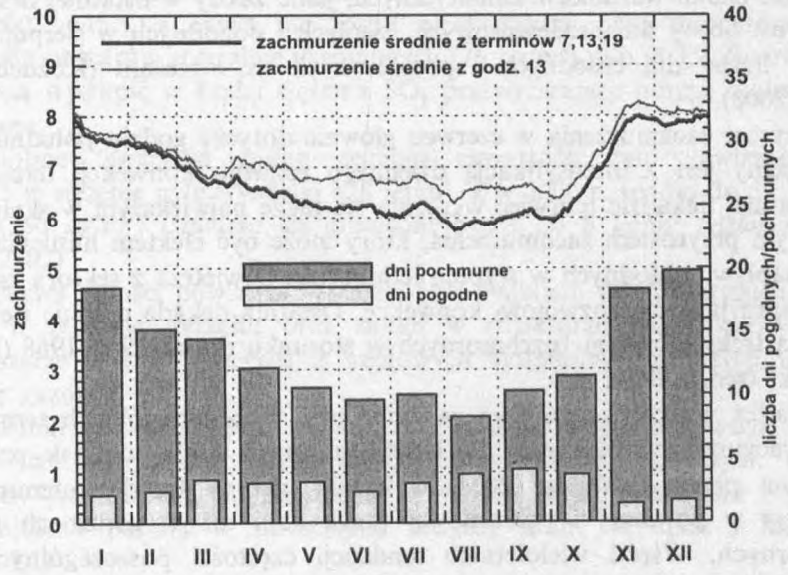
Table 4.1.2. The Sun culmination above horizon (H_s),the day length (D_L), the intensity and the daily sum of total (I_{t0h}, D_{t0h}) *and ultraviolet* (UVA + UVB, I_{uv0h}, D_{uv0h}) solar radiation on the upper limit of the atmosphere on 15th day in every month

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
H_s	17,2	24,9	36,2	47,7	56,9	61,5	60,0	53,2	42,7	31,1	21,0	15,3
D_L (godz.)	8,4	10,0	11,8	13,8	15,6	16,6	16,2	14,6	12,7	10,8	8,9	7,9
I_{t0h} (Wm^{-2})	389,8	576,5	797,3	1022,8	1172,1	1238,8	1218,0	1107,1	909,0	671,4	449,8	341,7
I_{uv0h} (Wm^{-2})	30,8	45,6	63,1	80,9	92,7	98,0	96,4	87,6	71,8	53,1	35,6	27,0
D_{t0h} (MJm^{-2})	7,4	13,2	21,4	31,6	40,0	44,3	42,7	35,8	26,0	16,4	9,1	6,1
D_{uv0h} (MJm^{-2})	0,6	1,0	1,7	2,5	3,2	3,5	3,4	2,8	2,0	1,3	0,7	0,5

4.2. PRZEBIEG ROCZNY ZACHMURZENIA W ŁODZI

Stopień pokrycia nieba przez chmury, obok uwarunkowań astronomicznych, jest głównym czynnikiem determinującym czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego. Czasowa zmienność zachmurzenia i usłonecznienia może być wzajemnie weryfikowana z uwagi na silną ujemną korelację tych elementów klimatu.

Podobnie jak na przeważającym obszarze Polski, wielkość zachmurzenia w Łodzi ma wyraźny bieg roczny z maksimum w listopadzie i grudniu oraz minimum w sierpniu (ryc. 4.2.1). Najniższe zachmurzenie w roku przypadające na miesiące pory ciepłej jest charakterystyczne dla wszystkich terminów obserwacyjnych. Najniższe zachmurzenie w roku w terminie porannym występuje od maja do sierpnia, w terminie południowym – od maja do września, a w terminie wieczornym od sierpnia do października (Wibig 2002). W przebiegu dobowym największe zachmurzenie, przewyższające średnią dla całej doby, notuje się w terminie południowym. Jest ono rezultatem rozwoju intensywnych procesów konwekcyjnych, szczególnie w ciepłej porze roku (ryc. 4.2.1).



Ryc. 4.2.1. Roczny przebieg zachmurzenia oraz częstość dni pogodnych i pochmurnych w Łodzi. Wartości z trzech terminów obserwacyjnych: godz. 7.00, 13.00, 19.00 (Fortuniak, Wibig 2002)
Fig. 4.2.1. Annual course of the cloudiness and the frequency of sunny and cloudy days in Łódź. The values at three observation terms: 7.00 a.m., 13.00 p.m., 19.00 p.m. Legend: large bars – cloudy days; small bars – clear days; bold line – mean cloudiness at three observation terms: 7.00 a.m., 13.00 p.m., 19.00 p.m.; line – mean cloudiness at 13.00 p.m. (Fortuniak, Wibig 2002)

Roczny przebieg zachmurzenia determinuje roczną zmienność liczby dni pogodnych (z zachmurzeniem $< 20\%$) i pochmurnych (z zachmurzeniem 80%). Pod względem liczby dni pogodnych najbardziej uprzywilejowany jest okres wiosny i jesieni. Dni pochmurne cechują się większą częstością w roku niż dni pogodne, a ich największa frekwencja (przeciętnie 20 dni) przypada na miesiące od listopada do stycznia. Najmniej dni pochmurnych notuje się w sierpniu (przeciętnie 6 dni) (*Atlas miasta Łodzi* 2002).

Porównanie wielkości zachmurzenia w dwóch dekadach 1959–1968 i 1989–1998 wykazało istotne zmniejszenie średniej rocznej oraz wzrost dziennych przyrostów zachmurzenia w drugim 10-leciu (Kożuchowski (red.) 2000). Średnie roczne zachmurzenie w analizowanych dekadach wynosi odpowiednio 5,82 i 5,55 (w skali 9-stopniowej). Zmniejszenie zachmurzenia w latach 1989–1998 jest charakterystyczne dla wszystkich miesięcy z wyjątkiem czerwca i września.

Sierpień wyróżnił się największym istotnym spadkiem, a wrzesień istotnym wzrostem zachmurzenia. Tendencje zachmurzenia w tych miesiącach są wyrazem zmian warunków klimatycznych, jakie zaszły w ostatniej dekadzie, tj. wzrost liczby dni bezdeszczowych, ciepłych i pogodnych w sierpniu oraz wzrost liczby dni chłodnych i pochmurnych we wrześniu (Kożuchowski (red.) 2000).

Przyrost zachmurzenia w czerwcu głównie dotyczy godzin południowych i związany jest z intensyfikacją dziennego rozwoju konwekcji termicznej. W ostatniej dekadzie czerwiec wyróżnia się także największym w skali roku dziennym przyrostem zachmurzenia, który może być efektem nasilenia częstości napływu chłodnych w sezonie letnim mas powietrza z sektora zachodniego sprzyjających rozwojowi konwekcji. Ostatnia dekada cechuje się także większą frekwencją dni bezchmurnych w stosunku do lat 1959–1968 (Kożuchowski (red.) 2000).

Analiza wielkości i rodzaju zachmurzenia w poszczególnych terminach obserwacyjnych w wieloleciu 1951–2000 na stacji Łódź-Lublinek przeprowadzona przez J. Wibig (2004) wykazała ujemny trend zachmurzenia, silniejszy w porannej i południowej porze dnia niż w godzinach przedwieczornych. Wśród wieloletnich tendencji częstości poszczególnych rodzajów chmur odnotowano spadek frekwencji chmur warstwowych (St, Nb) i wzrost częstości chmur konwekcyjnych. Największe wartości powyższych trendów odnotowano dla wieczornego terminu obserwacyjnego (Wibig 2004).

4.3. STAN ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA W ŁODZI

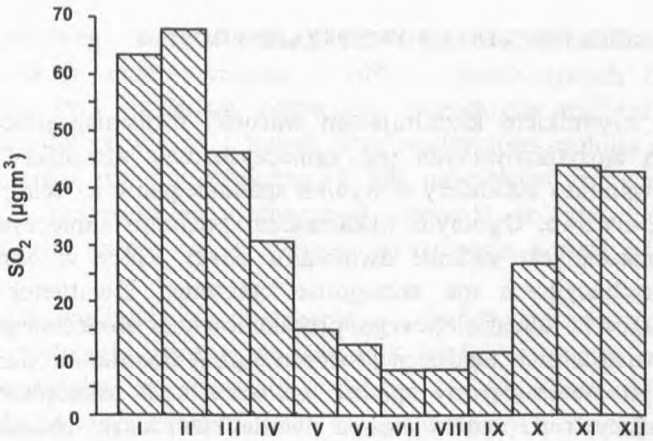
Ważnym czynnikiem kształtującym warunki transmisji promieniowania w obszarach zurbanizowanych jest zanieczyszczenie atmosfery przez pyły i gazy emitowane do atmosfery w wyniku spalania paliw na cele przemysłowe i komunalno-bytowe. Ogólnym wskaźnikiem poziomu zanieczyszczenia powietrza w mieście jest stężenie dwutlenku siarki, który w odniesieniu do stosunków radiacyjnych ma szczególne znaczenie. Dwutlenek siarki jest silnym reduktorem ultrafioletowego promieniowania słonecznego.

Analiza wieloletnich tendencji poziomu stężeń dwutlenku siarki w Łodzi wykazała jego systematyczny spadek we wszystkich miesiącach, sezonach i roku. Malejący trend zanieczyszczeń dwutlenkiem siarki charakterystyczny jest dla całego obszaru miasta począwszy od lat 70. (Kłysik, Fortuniak 1999). Na lata 90. przypadają najniższe wartości średniorocznych stężeń SO_2 (tab. 4.3.1, 4.3.2). W 2000 roku średnioroczne stężenie SO_2 spadło do 15 $\mu g/m^3$ przy obowiązującej normie 40 $\mu g/m^{-3}$, i zmniejszało się w miarę oddalania od śródmieścia do 4–6 $\mu g/m^3$ (*Atlas miasta Łodzi* 2002). W Łodzi od 1992 r. nie odnotowano przekroczenia normy średniodobowych stężeń SO_2 (200 $\mu g/m^3$), a nawet nie został przekroczony próg dopuszczalnych stężeń dla obszarów specjalnie chronionych (75 $\mu g/m^3$), tab. 4.3.2. Sporadycznie mogą wystąpić w Łodzi stężenia SO_2 przewyższające normy higieniczne powietrza.

Podobne tendencje zmian cechują zawartość pyłu zawieszonego. W 1985 r. stężenie pyłu wynosiło 128 $\mu g/m^3$, a w 2000 r. spadło do 59 $\mu g/m^3$ (norma 50 $\mu g/m^3$) i malało ku granicom Łodzi do 8 $\mu g/m^3$ (*Atlas miasta Łodzi* 2002).

Poprawa jakości powietrza w Łodzi jest wynikiem restrukturyzacji przemysłu w regionie łódzkim oraz zmian w strukturze paliw zużywanych na obszarze miasta (przejście z węglowych systemów grzewczych na instalacje gazowe).

Warunki aerosanitarne w mieście zmieniają się w cyklu rocznym. Największe stężenia zanieczyszczeń notuje się w okresie grzewczym, tj. od I dekady października do III dekady kwietnia. Najkorzystniejsze warunki aerosanitarne panują w miesiącach letnich, m.in. w lipcu i sierpniu (ryc. 4.3.1).



Ryc. 4.3.1. Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń dwutlenku siarki na dobę w centrum Łodzi (stacja przy ul. Zachodniej 81) w latach 1993–1997 (wg danych Kłysik, Fortuniak 1999)
Fig. 4.3.1. Annual course of the monthly mean values of sulphur dioxide concentration per day in the center of Łódź (Zachodnia 81 street) in the period 1993–1997 (by the values of Kłysik, Fortuniak 1999)

Tabela 4.3.1. Średnie roczne stężenia dwutlenku siarki na dobę (SO_2, w $\mu g/m^3$) w wybranych latach w centrum Łodzi (stacja przy ul. Zachodniej 81) (Kłysik, Fortuniak 1999)
Table 4.3.1. The annual mean of sulphur dioxide concentration per day (SO_2, in $\mu g/m^3$) in selected years in the center of Łódź (Zachodnia 81 street) (Kłysik, Fortuniak 1999)

1970	1975	1980	1985	1990	1993	1995	1997
146,3	145,0	91,0	64,0	74,2	42,5	27,3	25,6

40 $\mu g/m^3$ – norma dopuszczalnych średniorocznych stężeń SO_2
40 $\mu g/m^3$ – admissible norm of SO_2 concentration

Tabela 4.3.2. Średnie miesięczne i roczne stężenia SO_2 na dobę (w $\mu g/m^3$) w centrum Łodzi (stacja przy ul. Zachodniej 81) w latach 1993–1997 (Kłysik, Fortuniak 1999)
Table 4.3.2. The monthly and the annual mean of sulphur dioxide concentration per day (in $\mu g/m^3$) in the center of Łódź (Zachodnia 81 street) in the period 1993–1997 (Kłysik, Fortuniak 1999)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
63,4	67,8	46,2	30,7	15,1	12,6	8,2	8,3	11,3	26,8	44,1	43,1	31,4

200 $\mu g/m^3$ – norma dopuszczalnych stężeń SO_2 na dobę
200 $\mu g/m^3$ – admissible norm of SO_2 concentration per twenty-four hours
75 $\mu g/m^3$ – norma dopuszczalnych stężeń SO_2 dla obszarów specjalnie chronionych na dobę
75 $\mu g/m^3$ – admissible norm of SO_2 concentration per twenty-four hours on special protective region
40 $\mu g/m^3$ – norma dopuszczalnych średniorocznych stężeń SO_2 na dobę
40 $\mu g/m^3$ – annual average of admissible norm of SO_2 concentration

5. ZMIENNOŚĆ USŁONECZNIENIA W ŁODZI W LATACH 1951–2000

Usłonecznienie jest zmiennym w skali czasowej i przestrzennej elementem klimatu, odgrywającym pierwszorzędną rolę dla przebiegu procesów klimatotwórczych. Jako czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego do powierzchni czynnej kształtuje na danym obszarze strukturę i bilans promieniowania słonecznego. O wielkości usłonecznienia decyduje głównie czynnik astronomiczny determinujący długość dnia oraz czynnik makroskalowy, jakim jest cyrkulacja atmosferyczna i związane z nią zachmurzenie. Czas dopływu bezpośredniego strumienia energii słonecznej do powierzchni Ziemi jest modyfikowany przezroczystością atmosfery, zatem usłonecznienie może być wskaźnikiem stanu higienicznego powietrza, co ma szczególne znaczenie w obszarach wielkomiejskich. Określenie wieloletniego reżimu usłonecznienia na danym obszarze stanowi podstawę do oceny przydatności obszaru dla celów helioenergetycznych, helioterapeutycznych, agrarnych, planowania przestrzennego itp. Szczególnie ważne jest poznanie zmienności czasowej usłonecznienia z punktu widzenia biologicznego oddziaływania bezpośredniego promieniowania słonecznego na człowieka oraz wyodrębnienie korzystnych i niekorzystnych okresów w roku pod względem liczby godzin ze słońcem.

5.1. CECHY USŁONECZNIENIA RZECZYWISTEGO I WZGLĘDNEGO W BIEGU ROCZNYM ORAZ WIELOLETNIM

Średnia roczna suma usłonecznienia w Łodzi z okresu 1951–2000 wynosi 1560,4 godz., co stanowi 34,8% usłonecznienia możliwego (średnio 4,3 godz. dziennie), przewyższając o 34 godz. średnią dla Polski podaną przez Kuczmarskiego (1990) na podstawie danych z lat 1951–1975 oraz o 18,4 godz. średnią dla Łodzi z lat 1951–1990 (Fortuniak 1994, 1995). Największy udział usłonecznienia rzeczywistego w sumie rocznej przypada na wiosnę i lato (72%). Średnio w wieloleciu liczba godzin ze słońcem wiosną wynosi 479 godz. (38% usłonecznienia możliwego), a latem 648,3 godz. (45% usłonecznienia możliwego) (tab. 5.1.1, tab. 5.1.2). Na lato przypada najwyższa średnia

sezonowa suma usłonecznienia w roku, z wyjątkiem 1960 r., 1974 r. i 1980 r., kiedy to najwyższe sezonowe usłonecznienie zanotowano wiosną. Jesienią czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego nie przekracza 300 godz., a usłonecznienie względne nie przekracza 30%. Zimą suma usłonecznienia rzeczywistego jest najniższa w roku i wynosi średnio 138 godzin, stanowiąc przeciętnie 18% usłonecznienia możliwego. Przeciętny dzienny czas trwania promieniowania bezpośredniego był najdłuższy latem, 7,0 godz. i wiosną 5,2 godz. Jesienią słońce świeciło średnio 3,2 godz. dziennie, a zimą tylko 1,5 godz (tab. 5.1.1). Najwyższa średnia wieloletnia suma usłonecznienia przypada na lipiec (220 godz.), a wartość usłonecznienia względnego na sierpień (47%), podczas gdy najniższe wartości obu charakterystyk są rejestrowane w grudniu (33 godz., 13%). W ciągu 50 lat najwyższa miesięczna suma usłonecznienia w roku wystąpiła 10 razy w maju, 13 razy w czerwcu, 18 razy w lipcu i 9 razy w sierpniu. Najniższa w roku suma usłonecznienia wystąpiła 26 razy w grudniu, 14 razy w listopadzie, 9 razy w styczniu i 1 raz w lutym (załącznik, tab. I). Sumy miesięczne usłonecznienia rzeczywistego przekraczające 300 godz. i wartości usłonecznienia względnego ponad 60% mogą wystąpić w miesiącach od V do VIII. We wszystkich miesiącach z wyjątkiem maja, czerwca i sierpnia czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego może być mniejszy niż 100 godz. (tab. 5.1.1). Miesięczne wartości usłonecznienia możliwego poniżej 10% mogą pojawić się w okresie jesienno-zimowym od X do II (tab. 5.1.1). Największą w wieloleciu zmiennością usłonecznienia rzeczywistego od 98 godz. (1980 r.) do 367,9 godz. (1994 r.) i usłonecznienia względnego od 20% (1980 r.) do 73% (1994 r.) cechuje się lipiec. Średnie sumy miesięczne usłonecznienia w Łodzi z lat 1951–1975 porównano ze średnimi wielkościami usłonecznienia wyznaczonymi dla tego okresu dla całego obszaru Polski przez Kuczmarskiego (1990). Średnie usłonecznienie w Łodzi prawie pokrywa się z wartościami przeciętnymi usłonecznienia dla Polski. Suma roczna usłonecznienia w Łodzi w wymienionym 25-leciu jest niższa od średniej krajowej tylko o 7 godz. W ciągu roku najwyższe usłonecznienie przypada w czerwcu (216 godz.) i jest wyższe od przeciętnej dla Polski o 2 godz., a najniższe w grudniu, 32 godz. i jest niższe średnio o 1 godz. od przeciętnej dla całego obszaru kraju (tab. 5.1.2).

Uzupełnieniem charakterystyki rocznego przebiegu usłonecznienia opisywanego według wartości miesięcznych jest zmienność usłonecznienia względnego z miesiąca na miesiąc, obliczona jako różnica usłonecznienia względnego w miesiącu kolejnym i poprzedzającym. Wielkość ta obrazuje wpływ czynnika cyrkulacyjnego i związanego z nim zachmurzenia. W zmianach usłonecznienia względnego zachodzących z miesiąca na miesiąc notuje się w ciągu roku gwałtowny wzrost w okresie luty–marzec (średnio o 10%) oraz gwałtowny

Tabela 5.1.1. Średnie, najwyższe i najniższe sumy miesięczne, sezonowe i roczne usłonecznienia rzeczywistego (godz.) i względnego (%, wartości w nawiasach) w Łodzi w latach 1951–2000
Table 5.1.1. The mean, the highest and the lowest monthly, seasonal and annual totals of actual sunshine duration (in hour) and relative sunshine duration (in %, values in brackets) in Łódź in the period 1951–2000

M-ce	Średnie		Najwyższe		Rok	Najniższe		Rok
	miesięczne	dobowe	miesięczne	dobowe		miesięczne	dobowe	
I	45,7 (18)	1,5	86 (33)	2,8	1971	17,6 (7)	0,6	1953
II	60,3 (22)	2,1	133 (48)	4,7	1976	14,7 (5)	0,5	1973
III	115,2 (31)	3,7	186,9 (51)	6,0	1953	50,1 (14)	1,6	1985
IV	149,9 (36)	5,0	226,7 (54)	7,5	1988	81,4 (20)	2,7	1956
V	213,9 (44)	6,9	308,9 (64)	10,0	1979	107,2 (22)	3,4	1962
VI	215,8 (43)	7,2	301,4 (60)	10,0	1976	114,9 (23)	3,8	1997
VII	220,5 (44)	7,1	367,9 (73)	11,9	1994	98 (20)	3,2	1980
VIII	212,1 (47)	6,8	321,7 (71)	10,4	1973	139 (31)	4,5	1962
IX	144,8 (38)	4,8	205 (54)	6,8	1975	74,9 (20)	2,5	1996
X	105,2 (32)	3,4	187,3 (56)	6,0	1979	15,5 (5)	0,5	1952
XI	44,1 (17)	1,5	77,6 (29)	2,6	1994	7,6 (3)	0,2	1952
XII	32,9 (13)	1,1	96,5 (39)	3,1	1972	7,7 (3)	0,2	1959
III–V	479,0 (38)	5,2	647,6 (51)	7,0	1953	335,8 (26)	3,6	1958
VI–VIII	648,3 (45)	7,0	843,5 (58)	9,2	1983	413,9 (28)	4,5	1980
IX–XI	294,1 (30)	3,2	396,6 (40)	4,3	1991	128,1 (13)	1,4	1952
XII–II	138,9 (18)	1,5	215,8 (27)	2,4	1996	82,3 (10)	0,9	1952
Rok	1560,4 (35)	4,3	1921,4 (43)	5,2	1982	1275,1 (28)	3,5	1962

spadek usłonecznienia względnego w okresie październik–listopad (średnio o 15%), tab. 5.1.1. Zarówno wiosenny wzrost, jak i jesienny spadek usłonecznienia względnego ma charakter ogólnopolski (Zinkiewicz 1962). Przyczyny tego zjawiska wynikają ze zmian uwarunkowań astronomicznych w cyklu rocznym oraz ze zmian zachmurzenia.

Średnie wartości usłonecznienia rzeczywistego oraz względnego (ryc. 5.1.1., krzywa a i 5.1.2, słupki, tab. 5.1.3a, b) dla kolejnych dni roku w sposób bardziej szczegółowy niż wartości średnie miesięczne ilustrują roczny przebieg tych charakterystyk. Obie charakterystyki (usłonecznienie rzeczywiste i względne) cechuje duża zmienność z dnia na dzień. Kształt krzywej przebiegu usłonecznienia rzeczywistego jest zdeterminowany czynnikiem astronomicznym – zmianą długości dnia w roku. Zmianę tę obrazuje

krzywa usłonecznienia potencjalnego, tj. astronomicznie możliwego od wschodu do zachodu Słońca (ryc. 5.1.1, krzywa c). W miesiącach letnich, na które przypadają najdłuższe dni, zaznacza się wyraźny spadek średniego usłonecznienia rzeczywistego i względnego w stosunku do wartości możliwych – największy w drugiej połowie lipca, a także w drugiej połowie czerwca.

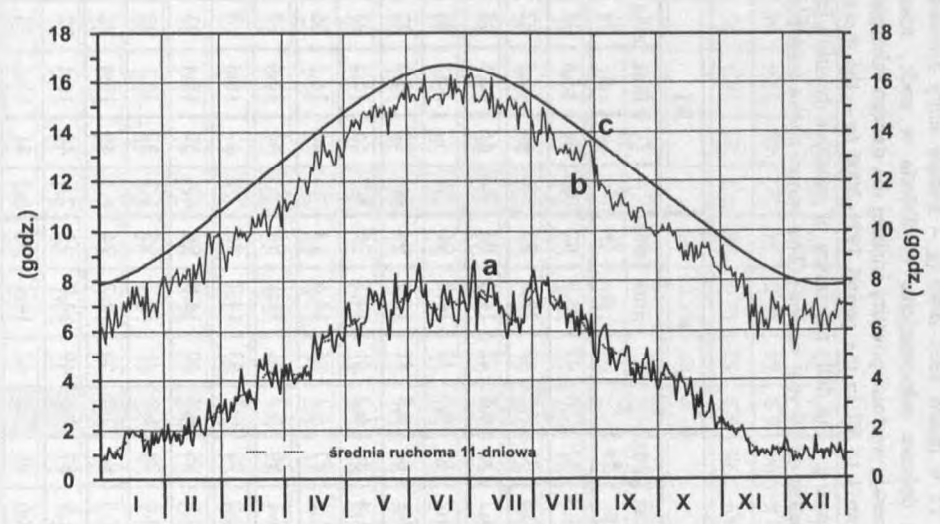
Tabela 5.1.2. Średnie wartości usłonecznienia rzeczywistego (godz.) i względnego (%) dla Polski i Łodzi z lat 1951–1975

Table 5.1.2. The mean values of actual sunshine duration (in hour) and relative sunshine duration (in %) in Poland and Łódź in the period 1951–1975

Miejsce	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Polska (godz.)	44	59	117	148	191	214	213	204	157	102	44	33	1526
Łódź (godz.)	43	55	120	148	189	216	210	205	158	100	42	32	1519
Polska (%)	17	21	32	35	39	43	42	45	41	31	17	13	34
Łódź (%)	17	20	33	36	39	43	42	45	41	30	16	13	34

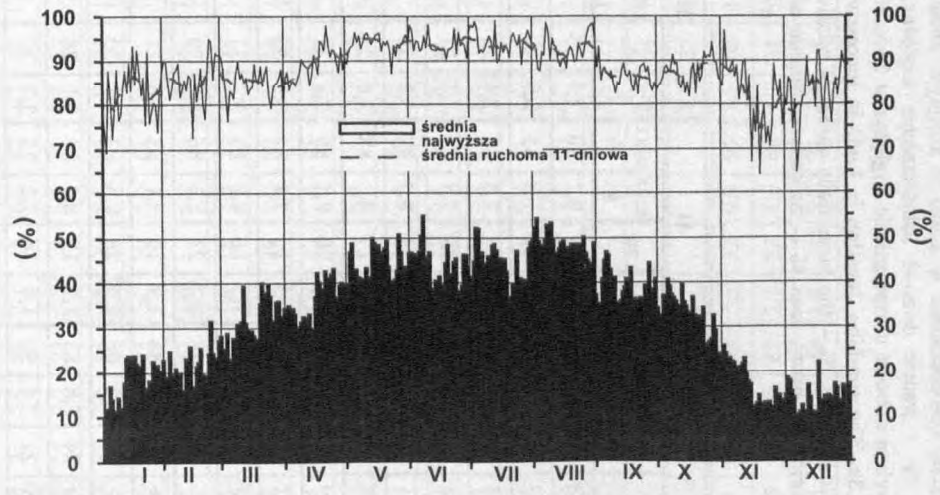
Spadek ten jest konsekwencją wzrostu zachmurzenia w tym okresie roku. Najbardziej korzystnymi warunkami usłonecznienia spośród miesięcy letnich wyróżnia się sierpień, z wyrównanym średnim dobowym czasem trwania promieniowania bezpośredniego (ryc. 5.1.2).

W tabelach 5.1.3a i 5.1.3b zaznaczono średnie sumy dobowe usłonecznienia przewyższające wartość przeciętną dla danego miesiąca. Najdłuższe zwarte okresy uprzywilejowane pod względem czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego występują w kwietniu (13 dni, 18–30 IV), sierpniu (12 dni, 5–16 VIII), a kilkudniowe okresy z usłonecznieniem powyżej 7 godzin mogą pojawić się w okresie od maja do sierpnia. Wśród miesięcy jesiennych względnie pogodny jest okres 2–6 IX i 12–16 XI, kiedy sumy dobowe przekraczają 5 godz., oraz pierwsza dekada października (2–8 X), kiedy notuje się średnio 4 godziny ze słońcem. Według kryterium bioklimatycznego czas trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego minimum 4 godz. dziennie jest przyjmowany za dolną granicę bakteriobójczego działania promieni słonecznych (Kozłowska-Szczęsna i in. 1997). W okresie od listopada do lutego suma dobowa usłonecznienia nie przekracza granicznej wartości niedoboru światła przyjętej według powyższego kryterium.



Ryc. 5.1.1. Przebieg roczny średnich (a), najwyższych (b) i potencjalnych (c) sum dobowych usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.1. Annual course of the mean (a), the maximum (b) and the potential (c) daily totals of actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.1.2. Przebieg roczny średnich i najwyższych dobowych wartości usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.2. Annual course of the mean and the maximum daily values of relative sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Tabela 5.1.3a. Usłonecznienie w Łodzi w kolejnych dniach w okresie od I do VI w latach 1951–2000 (g – średnie sumy dobowe w godz., % – średnie dobowe usłonecznienie względne, max g – najwyższe dobowe usłonecznienie w 50-leciu w godz., max % – najwyższe dobowe usłonecznienie względne w 50-leciu). Pola zacienione oznaczają wartości powyżej średniej dla danego miesiąca
Table 5.1.3a. The sunshine duration in Łódź in successive days in the term from I to VI in the period 1951–2000 (g – the mean daily totals in hours, % – the mean daily values of relative sunshine duration, max g – the daily maximum of sunshine duration in 50-year period (in hour), max % – the daily maximum of relative sunshine duration in 50-year period). The values above monthly average are shaded

Dni	I				II				III				IV				V				VI			
	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %
1	0,8	10	6,2	78	1,7	19	8,2	90	2,9	25	9,5	87	4,7	35	11,3	87	7,0	47	13,7	92	7,4	44	15,8	97
2	0,9	12	5,9	74	2,3	25	7,8	85	3,3	29	9,1	83	4,0	32	10,8	83	7,2	49	13,9	93	7,6	46	15,2	92
3	0,8	10	5,5	69	1,5	16	7,5	81	2,4	23	8,4	76	4,7	34	11,1	85	6,4	42	14,0	93	7,6	46	15,5	95
4	1,3	17	7,0	88	1,8	19	7,8	84	2,5	21	9,2	83	4,2	33	11,2	85	6,5	43	14,5	96	7,8	47	15,5	94
5	1,1	14	6,5	81	2,0	21	8,2	87	3,2	28	9,2	83	3,9	30	11,1	84	6,5	41	14,2	94	8,4	50	15,3	92
6	0,9	11	5,8	72	1,6	17	8,3	88	2,8	25	9,1	81	4,1	30	11,4	86	6,2	41	14,5	96	8,7	55	15,3	93
7	0,9	11	6,4	80	1,9	20	8,5	89	3,4	31	9,8	87	4,1	31	11,6	87	5,4	36	14,4	93	7,6	46	15,8	96
8	1,2	14	7,1	88	1,5	15	7,8	82	3,2	30	10,2	90	4,3	32	12,1	90	6,3	41	14,1	94	7,4	43	15,6	93
9	1,0	12	6,2	77	1,5	16	8,0	83	3,7	31	9,8	86	4,1	29	12,0	89	6,3	43	14,7	96	7,9	47	16,3	98
10	0,8	10	6,3	78	2,2	23	8,3	86	4,5	39	10,0	87	4,5	32	12,0	89	6,4	40	14,8	96	6,4	39	15,4	93
11	1,4	18	6,8	83	1,9	19	8,1	83	3,6	31	9,8	85	4,2	33	12,0	88	6,7	41	14,7	95	6,2	37	15,1	93
12	1,9	23	7,2	88	2,5	26	8,5	87	3,5	30	10,0	86	4,3	30	11,5	84	7,8	50	14,7	94	6,3	40	15,4	92
13	2,0	24	6,8	83	1,7	17	8,5	86	3,1	28	9,6	82	4,0	29	11,9	87	7,6	49	14,9	95	7,1	40	15,4	92
14	1,8	21	7,4	90	1,4	14	7,2	73	3,7	29	9,8	84	5,1	37	12,6	91	7,2	47	14,4	96	6,7	41	15,5	93
15	2,0	24	6,9	83	2,1	21	8,7	87	3,3	28	9,9	84	5,9	42	12,4	90	7,6	48	15,0	96	6,4	39	15,5	93
16	2,0	24	7,8	93	2,3	22	8,1	81	3,3	28	10,6	89	5,5	40	13,2	87	7,4	47	15,1	96	6,4	39	15,5	93
17	1,9	22	7,1	85	2,6	25	8,5	84	2,9	24	10,2	85	4,8	34	13,2	94	6,9	45	14,6	92	7,4	44	15,5	93
18	1,8	22	7,8	93	2,0	19	9,0	88	4,1	35	10,2	85	5,3	39	12,5	94	7,3	48	14,9	94	7,9	48	15,1	90
19	1,8	21	7,4	87	2,0	19	8,2	80	4,9	40	10,7	89	5,9	43	13,0	92	7,8	49	14,8	94	7,3	41	15,5	93
20	2,1	24	7,0	82	1,8	18	7,9	77	4,5	35	10,2	84	5,8	41	13,9	98	7,1	44	15,0	95	7,1	42	15,5	93
21	1,2	14	7,4	86	2,5	24	9,0	87	4,5	38	10,6	87	5,8	41	13,3	93	6,4	40	14,8	93	7,6	45	15,6	93
22	1,4	17	6,5	75	3,3	32	9,9	95	5,1	40	10,9	89	5,8	42	13,0	91	5,7	36	13,9	87	7,1	45	16,3	97
23	1,6	18	8,0	92	2,6	24	9,9	94	4,3	37	10,1	82	6,3	43	13,3	93	6,9	41	15,0	94	6,4	38	15,3	92
24	1,0	11	6,6	76	2,2	21	9,1	86	4,1	32	9,8	79	5,4	37	13,0	92	6,7	43	14,6	91	6,4	38	16,1	96
25	2,0	23	6,9	79	2,5	23	9,8	92	3,8	31	10,4	83	5,2	37	12,7	90	8,3	51	15,1	94	6,3	39	15,6	93
26	1,4	16	7,1	80	2,9	27	9,8	91	4,3	36	10,6	85	5,8	39	12,7	87	7,2	47	14,9	93	7,9	46	15,7	94
27	1,9	22	7,1	80	3,1	28	9,9	91	4,6	36	10,7	85	6,0	40	13,6	93	7,0	41	15,2	94	7,6	46	15,6	94
28	1,5	17	6,6	74	2,7	25	9,8	90	4,0	33	10,9	86	5,7	39	13,4	88	6,7	44	15,4	95	7,2	44	15,1	91
29	1,8	21	7,5	84					3,5	27	11,2	88	5,6	39	13,0	91	7,1	43	15,6	96	6,8	41	16,1	97
30	2,1	23	7,9	87					4,5	34	10,2	80	6,0	40	13,2	89	7,9	47	15,3	94	6,8	41	16,3	98
31	1,6	17	8,2	90					4,1	32	11,1	86					7,2	47	16,0	98				
Max	2,1	24	8,2	93	3,3	32	9,9	95	5,1	40	11,2	90	6,3	43	13,9	98	8,3	51	16,0	98	8,7	55	16,3	98
Śred.	1,5	18	7,0	83	2,1	22	8,6	86	3,7	31	10,1	85	5,0	36	12,4	90	6,9	44	14,8	94	7,2	43	15,6	94
Min	0,8	10	5,5	69	1,4	14	7,2	73	2,4	21	8,4	76	3,9	29	10,8	83	5,4	36	13,7	87	6,2	37	15,1	90

Tabela 5.1.3b. Usłonecznienie w Łodzi w kolejnych dniach w okresie od VII do XII w latach 1951–2000 (g – średnie sumy dobowe w godz., % – średnie dobowe usłonecznienie względne, max g – najwyższe dobowe usłonecznienie w 50-leciu w godz., max % – najwyższe dobowe usłonecznienie względne w 50-leciu). Pola zacienione oznaczają wartości powyżej średniej dla danego miesiąca
Table 5.1.3b. The sunshine duration in Łódź in successive days in the term from VII to XII in the period 1951–2000 (g – the mean daily totals in hours, % – the mean daily values of relative sunshine duration, max g – the daily maximum of sunshine duration in 50-year period (in hour), max % – the daily maximum of relative sunshine duration in 50-year period). The values above monthly average are shaded

Dni	VII				VIII				IX				X				XI				XII			
	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %	g	%	max g	max %
1	7,5	45	16,2	97	8,5	54	14,4	93	4,7	34	12,7	93	3,7	33	9,9	85	2,3	24	9,4	97	1,7	18	7,0	80
2	8,6	52	16,4	99	7,9	49	13,6	88	5,7	41	11,6	85	4,2	37	10	86	2,1	21	8,5	88	1,5	18	6,8	86
3	8,9	52	16,1	97	7,2	48	13,5	88	6,0	45	11,9	88	4,3	36	10,2	88	2,2	23	8,4	88	1,1	15	6,9	85
4	6,1	37	15,2	92	6,7	46	14,1	92	6,2	47	11,8	88	4,7	41	10	89	1,9	22	8,4	88	1,1	14	6,0	75
5	7,6	47	15,3	93	7,9	50	13,9	91	6,2	46	11,7	88	4,4	39	10	88	2,1	22	8,5	90	0,7	10	6,5	81
6	7,4	44	15,2	92	8,0	53	15,0	99	5,5	43	11,5	86	4,2	37	10,3	88	1,9	19	8,1	86	0,9	10	5,2	65
7	7,3	44	15,3	93	7,8	52	14,7	97	4,6	33	11,6	88	4,2	37	10	91	1,8	21	8,3	89	0,8	11	5,6	70
8	7,3	46	15,5	94	8,2	53	13,6	90	5,3	41	11,2	85	4,0	36	9,8	89	2,0	21	7,5	81	1,0	12	6,3	79
9	7,2	44	15,7	96	7,1	49	14,3	95	4,7	35	10,8	82	3,2	29	10	90	2,0	22	7,8	85	0,8	10	6,5	82
10	7,9	48	15,5	95	7,1	45	14,0	94	4,4	35	11,1	85	3,9	35	9,4	85	2,2	23	8,2	90	0,9	11	6,5	82
11	8,0	49	14,9	91	6,9	47	13,9	93	4,6	36	11,0	84	4,3	39	9,2	83	1,8	19	8,2	90	1,3	17	7,2	91
12	7,9	47	16,2	99	7,1	48	13,4	90	5,0	38	11,3	88	3,9	36	9,5	87	1,5	18	7,3	81	1,2	14	6,6	84
13	7,0	42	14,6	89	7,1	49	13,1	89	5,1	39	11,5	89	3,9	35	8,8	82	1,6	17	7,8	87	0,8	11	6,7	85
14	7,6	45	14,7	90	7,4	49	13,3	90	5,0	41	11,1	87	3,3	31	9,2	85	0,9	12	6,0	67	0,8	11	6,8	87
15	6,7	42	15,3	94	7,0	47	13,3	91	5,4	40	11,0	86	3,6	33	8,8	82	1,1	12	7,0	79	0,7	9	6,2	79
16	7,0	45	14,9	92	7,2	48	13,2	88	5,4	43	11,1	88	4,1	37	9,4	88	1,1	13	6,5	74	1,8	22	7,2	92
17	6,9	43	15,1	93	6,1	41	13,5	92	4,2	33	10,6	84	3,3	33	9,5	89	1,3	15	7,4	84	1,0	12	7,2	92
18	6,0	37	15,0	93	6,7	49	13,2	93	4,5	36	10,4	83	2,4	23	8,7	82	0,9	10	5,6	64	1,0	13	6,5	83
19	5,7	35	14,6	91	6,6	46	13,3	92	3,9	30	10,8	87	3,4	32	9,4	90	1,1	13	6,6	76	1,2	14	5,9	76
20	6,4	40	15,3	95	6,8	49	12,9	90	4,6	36	10,3	82	2,9	27	8,9	85	1,2	13	6,9	80	0,7	11	6,6	85
21	6,3	40	15,4	96	6,0	40	12,9	90	4,3	37	10,9	88	3,7	34	9,0	87	0,9	12	6,1	71	1,1	15	6,8	87
22	7,6	47	15,1	95	6,6	49	13,4	94	4,0	33	10,9	89	2,6	26	9,5	92	1,1	13	6,4	75	1,2	14	6,3	81
23	6,4	40	14,9	94	5,8	40	13,1	92	4,8	39	10,9	89	2,5	23	9,3	91	1,1	12	6,0	71	0,8	11	5,9	76
24	6,6	41	15,2	96	7,1	50	12,8	91	4,9	38	10,7	87	2,6	27	9,3	91	0,8	11	6,4	76	1,3	17	6,5	83
25	5,9	37	14,1	89	6,4	47	13,1	93	5,3	44	10,1	89	2,7	27	9,5	91	1,3	16	7,5	89	1,3	16	6,7	86
26	6,5	41	15,0	95	6,6	45	13,4	96	4,5	38	10,1	84	3,4	33	9,0	94	1,2	14	7,1	85	1,1	13	6,4	82
27	6,3	40	15,0	95	6,4	44	13,6	97	3,9	30	10,1	83	2,9	29	8,9	90	1,3	15	6,8	82	1,0	13	6,8	87
28	7,4	48	15,2	97	5,8	44	13,6	98	4,7	41	10,0	85	2,0	20	8,5	89	1,0	12	7,1	86	1,4	17	7,2	92
29	7,7	49	14,9	95	6,7	49	13,6	98	4,1	34	9,8	83	2,2	24	8,5	86	1,1	13	6,2	75	1,0	12	7,0	89
30	7,7	50	14,6	94	5,1	37	13,0	95	3,6	31	9,9	84	2,3	24	8,4	86	1,3	15	6,7	82	0,7	9	7,1	90
31	8,2	52	14,6	94	4,9	35	12,1	88					2,5	26	8,2	84					1,4	17	7,0	89
Max	8,9	52	16,4	99	8,5	54	15,0	99	6,2	47	12,7	93	4,7	41	10,3	94	2,3	24	9,4	97	1,8	22	7,2	92
Śred.	7,1	44	15,2	94	6,8	47	13,6	93	4,8	38	11,0	87	3,4	32	9,4	88	1,5	17	7,4	82	1,1	13	6,6	84
Min	5,7	35	14,1	89	4,9	35	12,1	88	3,6	30	9,8	82	2,0	20	8,2	82	0,8	10	5,6	64	0,7	9	5,2	65

W przebiegu rocznym najwyższych absolutnych wartości usłonecznienia rzeczywistego i względnego w analizowanym 50-leciu dużą zmiennością z dnia na dzień wyróżniają się miesiące od listopada do lutego. Największe wahania powyższej charakterystyki usłonecznienia występują w listopadzie, kiedy najwyższe absolutne sumy dobowe zmieniały się od 64 do 97% usłonecznienia możliwego (ryc. 5.1.2, tab. 5.1.3b). Największą stabilnością absolutnych najwyższych dobowych wartości usłonecznienia cechuje się okres 1–20 V (92–96% usłonecznienia możliwego).

Usłonecznienie jest jednym z najbardziej zmiennych w skali czasowej elementów klimatu, którego prognozowanie należy do zagadnień trudnych i złożonych. Analiza 50-letniego szeregu sum rocznych, sezonowych i miesięcznych usłonecznienia w Łodzi wykazała dużą zmienność czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi.

Sumy roczne usłonecznienia cechuje duża zmienność z roku na rok. Wartości ekstremalne sum rocznych usłonecznienia wystąpiły w latach: 1982 (1921,4 godz. – 42,8% usłonecznienia możliwego) i 1962 (1275,1 godz. – 28,4% usłonecznienia możliwego), różnica usłonecznienia w wymienionych latach wyniosła 646,3 godz. (ryc. 5.1.4).

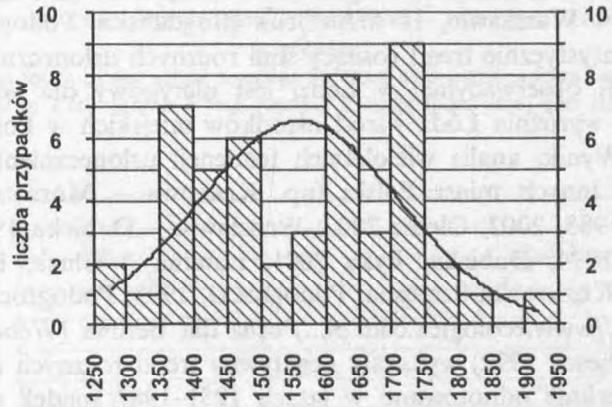
Tabela 5.1.4. Średnie roczne sumy usłonecznienia rzeczywistego (w godz.) w Łodzi w dekadach wielolecia 1951–2000
Table 5.1.4. The mean annual totals of actual sunshine duration (in hour) per decades in Łódź in the period 1951–2000

Lata		Średnia	Odchylenie standardowe
Dekada I	(1951–1960)	1503,2*	152,7
Dekada II	(1961–1970)	1504,5*	148,0
Dekada III	(1971–1980)	1557,1	139,5
Dekada IV	(1981–1990)	1600,4	196,8
Dekada V	(1991–2000)	1636,8	100,9
I 25-lecie	(1951–1975)	1518,9**	139,6
II 25-lecie	(1976–2000)	1601,9	159,02
Rok		1560,4	153,9

* Wartości różnią się istotnie na poziomie 5% od średniej z dekady V.
* The values differ from average of decade V on 5% significant level.
** Wartość różni się istotnie na poziomie 5% od średniej z II 25-lecia.
** The value differ from average of the second part of 25-year period on 5% significant level.

W ciągu dwóch pierwszych dekad dominowały lata z roczną sumą godzin ze słońcem nieprzekraczającą średniej wieloletniej, czego wyrazem są najniższe średnie dekadowe z tego okresu oraz niższa średnia dla I 25-lecia (tab. 5.1.4). Pod względem dużych wahań z roku na rok wyróżnia się dekada IV z największymi odchyleniami od średniej wieloletniej. Ostatnia dekada charakteryzuje się najwyższym usłonecznieniem w 50-leciu, a począwszy od 1988 roku wszystkie lata z wyjątkiem 1997 r. cechuje wyższa od przeciętnej suma roczna godzin ze słońcem (ryc. 5.1.4).

W analizowanym 50-leciu najczęściej notowane są w Łodzi sumy roczne w przedziale 1700–1750 godz. (ryc. 5.1.3). Empiryczny rozkład rocznych sum usłonecznienia w latach 1951–2000, chociaż kształtem zbliża się do rozkładu bimodalnego, spełnia kryterium rozkładu normalnego (test Shapiro-Wilka na poziomie istotności 5%). Wśród pozostałych przedziałów sum rocznych znaczną frekwencją wyróżniają się przedziały 1600–1650 godz. i 1350–1400 godz.



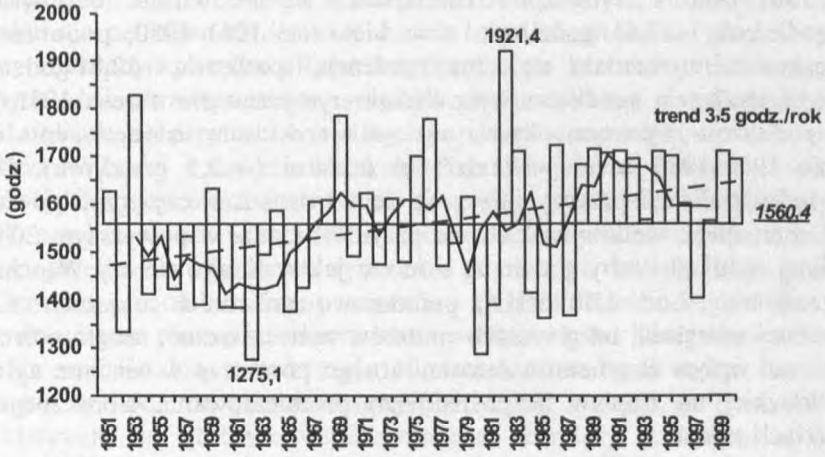
Ryc. 5.1.3. Histogram sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.1.3. Histogram of the annual totals of actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Stwierdzono statystycznie istotny wzrost sum rocznych usłonecznienia w 50-leciu o 3,5 godz. na rok (ryc. 5.1.4, tab. 5.1.5). Istotność tendencji została potwierdzona przez test współczynnika korelacji Pearsona oraz przez nieparametryczny test rangowy Mann-Kendalla (ryc. 5.1.5, tab. 5.1.5). Rycina 5.1.5 przedstawia przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznych sum usłonecznienia rzeczywistego w analizowanym 50-leciu. Ogólny przebieg krzywej statystyki progresywnej jest zbieżny z przebiegiem średniej ruchomej. Dekada I cechuje się spadkową tendencją sum rocznych usłonecznienia, nieprzekraczającą wartości krytycznej. Od początku

lat 60. zaznacza się wzrost wartości statystyki U (a), słabnie tendencja spadkowa. Od 1967 r. notuje się w Łodzi przewagę dodatnich odchyleń od średniej, najsilniejszy wzrost dodatniej tendencji sum rocznych usłonecznienia wystąpił od połowy lat 80. Silny wzrost usłonecznienia w Łodzi znajduje potwierdzenie w tendencjach przebiegu solarnych komponentów klimatu (usłonecznienie, całkowite promieniowanie słoneczne) obserwowanych w innych regionach Polski w ostatnim 20-leciu (Dubicka, Pyka 2001; Kożuchowski (red.) 2000; Bogdańska, Podogrocki 2000). We Wrocławiu począwszy od lat 80. notuje się przyrost rocznych sum usłonecznienia przeciętnie o 6,37 godz./rok, podczas gdy w Łodzi w latach 1980–2000 przyrost sum rocznych usłonecznienia wynosi przeciętnie 6,9 godz/rok. W Szczecinie, Toruniu, Suwałkach, Przemyślu, Wrocławiu w ostatniej dekadzie odnotowano istotny wzrost usłonecznienia względnego (Kożuchowski (red.) 2000). Podobne tendencje cechują sumy roczne promieniowania całkowitego rejestrowane w latach 1961–1995 na stacjach Gdynia, Kołobrzeg, Mikołajki, Kasprowy Wierch. Największy, istotny statystycznie wzrost promieniowania całkowitego zanotowano w Warszawie, 11 MJm^{-2}/rok (Bogdańska, Podogrocki 2000).

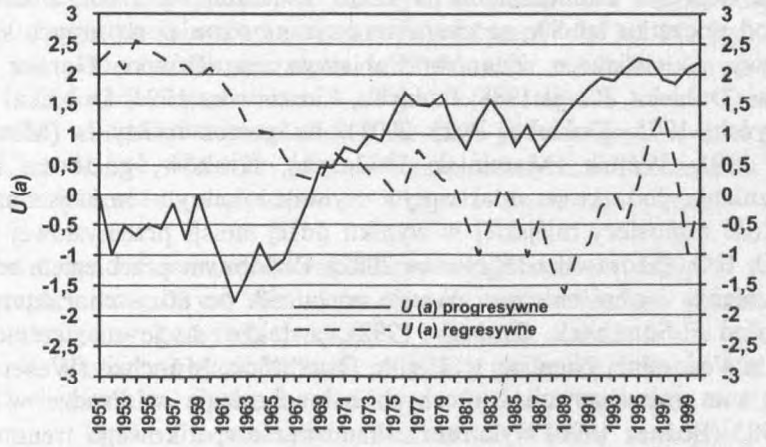
Istotny statystycznie trend rosnący sum rocznych usłonecznienia dla całej 50-letniej serii obserwacyjnej w Łodzi jest nietypowy dla wielkomiejskich aglomeracji i wyróżnia Łódź wśród ośrodków miejskich w Polsce i Europie Środkowej. Wyniki analiz wieloletnich tendencji usłonecznienia przeprowadzonych dla innych miast Polski (np. Krakowa – Morawska-Horawska 1963, 1984, 1985, 2002; Olecki 2002; Wrocławia – Dubicka 1990; Dubicka, Limanówka 1994; Dubicka, Pyka 2001; Lublina – Gluza, Filipiuk 1995; Warszawy – Kozłowska-Szczęsna, Podogrocki, 1995; Podogrocki 2002; Podogrocki http://www.ecologica.com.pl...) oraz dla Berlina (Weber 1990) i dla Wiednia (Dobesch 1992) wykazały negatywny trend rocznych sum usłonecznienia. W Berlinie odnotowano w latach 1951–1987 spadek czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego o 247 godz., a w Wiedniu w latach 1960–1989 o 50 godz.

W Krakowie spadek rocznych sum usłonecznienia wynosił –3,3 godz./rok w latach 1889–1958 i –11 godz./rok w latach 1951–1980. W wydłużonej krakowskiej serii heliograficznej, tj. od 1890 do 1993, notuje się mniejszy spadek roczny usłonecznienia niż we wspominanym 30-leciu, utrzymujący się na poziomie 3,3 godz./rok. W Lublinie trend spadkowy rocznych sum usłonecznienia w okresie 1952–1991 wynosił –4,9 godz./rok. W Warszawie czas trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego zmniejszał się w latach 1903–1992 o –78 min/rok, a w okresie wydłużonym do 1998 spadek roczny wynosił –52 min/rok. Zmniejszający się trend usłonecznienia w Warszawie po włączeniu do analizy lat 1993–1998 świadczy o tendencjach wzrostowych w ostatnim 10-leciu. Usłonecznienie we Wrocławiu w la-



Ryc. 5.1.4. Roczne sumy usłonecznienia rzeczywistego w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana

Fig. 5.1.4. Annual totals of the actual sunshine duration as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź (bars). 5-year running average (solid line) and trend (dashes line)



Ryc. 5.1.5. Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznych sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.5. Course of the sequence values of Mann-Kendall test for annual totals of the actual sunshine duration. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$

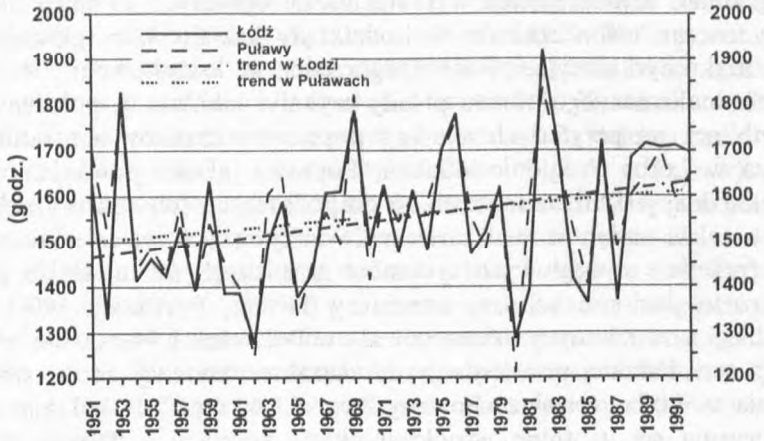
tach 1901–1980 i 1901–2000 zmniejszało się w tempie odpowiednio –3,8 godz./rok i –2,61 godz./rok, a w wielolecie 1951–1980, podobnie jak w Krakowie, wyróżniało się silną tendencją spadkową –10,8 godz./rok. W Łodzi tendencja spadkowa była charakterystyczna dla okresu 1951–1966 (–8,8 godz./rok), po tym okresie nastąpił wzrost sum usłonecznienia i dla 30-lecia 1951–1980 trend w Łodzi był dodatni (+ 2,5 godz./rok). Okres silnej industrializacji przyczyniający się do wzrostu zanieczyszczeń powietrza w aglomeracjach wielkomiejskich nie przyniósł Łodzi w powyższym 30-leciu tak silnej redukcji liczby godzin ze słońcem jak w Krakowie czy Wrocławiu. Położenie stacji Łódź-Lublinek na południowo-zachodnich rubieżach miasta, w znacznej odległości od głównych emiterów zanieczyszczeń, mogło pośrednio ograniczać wpływ złego stanu aerosanitarnego powietrza w centrum aglomeracji łódzkiej na dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego na peryferiach miasta.

Wieloletnie tendencje rocznych sum usłonecznienia opisywane w wymienionej literaturze nie są w pełni porównywalne z wynikami prezentowanego opracowania z uwagi na różnorodność okresów badawczych, w większości nieuwzględniających ostatniego dziesięciolecia. Pomimo że trend dla całej 50-letniej serii pomiarów jest w Łodzi dodatni, w przeciwieństwie do opisywanych aglomeracji miejskich, to charakter tendencji zmian usłonecznienia w Łodzi pozostaje zbliżony do innych stacji w Polsce i Europie Środkowej. Wyraźna depresja usłonecznienia w Łodzi w latach 50. i 60., a następnie wzrost od początku lat 80., są charakterystyczne również na innych stacjach tj. Puławy, Skierniewice, Zdanów, Sobieszyn (za: Górski, Górska 2000), Wrocław (Dubicka, Karal 1988; Dubicka, Limanówka 1994; Dubicka, Karal, Ropuszyński 1995; Dubicka, Pyka 2001), Bydgoszcz i Gdynia (Marciniak, Wójcik 1991; Wójcik, Marciniak 1993a, b), Kraków, gdzie na spadek usłonecznienia dodatkowo miał wpływ czynnik lokalny – zmniejszona przezroczystość atmosfery miejskiej w wyniku dużej emisji przemysłowej pyłów, SO_2, CO, NO_x (Morawska-Horawska 2002). Podobnym przebiegiem wartości usłonecznienia – obniżeniem w okresie od lat 50. do 80. – charakteryzował się Wiedeń i Sonnblick (Dobesh 1992), a także stacje na terenie byłej Republiki Federalnej Niemiec, tj. Berlin, Osnabrück, München (Weber 1990). Analiza sum miesięcznych i rocznych usłonecznienia w Pradze w latach 1961–1985 (Bednar 1990) wykazała zahamowanie spadkowego trendu z początkiem lat 80. Podobne tendencje liczby godzin ze słońcem cechowały stacje meteorologiczne na obszarze Słowacji (analiza w oparciu o dane z 9 stacji) w latach 1956–1985. Na terytorium Słowacji w pierwszej połowie lat 80. odnotowano gwałtowny wzrost sum rocznych usłonecznienia (Horecka 1990). Według R. Brazdila, spadek rocznych sum usłonecznienia w okresie od połowy lat 40. do lat 70. jest charakterystyczną cechą zmian tego elementu klimatu w Europie Środkowej (za: Dubicka, Limanówka 1994).

Przebieg zmian usłonecznienia w Łodzi na tle opisanych tu stacji dowodzi, że sumy roczne usłonecznienia w Łodzi były kształtowane głównie przez procesy makrocyrkulacyjne. Rolę drugorzędną w kształtowaniu warunków solarnych analizowanego okresu pełniły czynniki lokalne, tj. położenie stacji Łódź-Lublinek na peryferiach miasta i poprawa warunków aerosanitarnych powietrza w Łodzi i regionie łódzkim. Poprawa jakości powietrza w aglomeracji łódzkiej jest efektem przemian gospodarczych (restrukturyzacja przemysłu), a także zmian w strukturze paliw zużywanych na cele komunalno-bytowe (przejście z węglowych systemów grzewczych na instalacje gazowe) oraz wzrostu poziomu ochrony atmosfery (Kłysik, Fortuniak 1999).

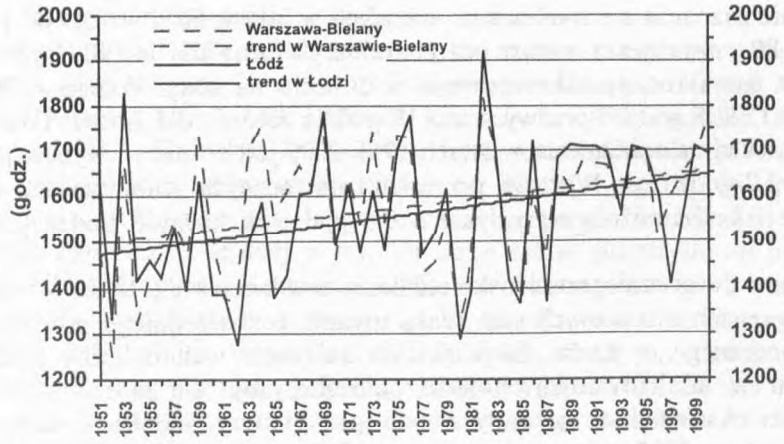
Przebiegi sum rocznych usłonecznienia w Puławach i Warszawie w odniesieniu do serii łódzkiej potwierdzają, że charakter tendencji zmian sum usłonecznienia w Łodzi został zachowany (ryc. 5.1.6, ryc. 5.1.7). Dane łódzkie charakteryzują się istotnym współczynnikiem korelacji z danymi ze stacji Puławy (0,88) i ze stacji Warszawa-Bielany (0,81). Średnia roczna suma usłonecznienia w latach 1951–1992 w Łodzi wynosi 1549,1 godz. i jest o 7,4 godz. niższa niż w Puławach. W Puławach, podobnie jak w Łodzi, w porównywanym okresie 1951–1992 notuje się wzrost czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego przeciętnie o 2,7 godz./rok, co daje niższy przyrost usłonecznienia o 1,3 godz./rok w stosunku do stacji łódzkiej. W przebiegu warszawskiej serii usłonecznienia, podobnie jak w przebiegu serii łódzkiej wyraźnie zaznacza się spadek sum rocznych w latach 50. i wzrost od początku lat 80.; największy wzrost jest charakterystyczny dla lat 90. (ryc. 5.1.7). Średnia suma roczna usłonecznienia w 50-leciu na stacji Warszawa-Bielany wynosi 1577,5 godz. i przewyższa o 17 godzin średnią dla Łodzi. Trend serii warszawskiej usłonecznienia w latach 1951–2000 jest rosnący i wynosi przeciętnie + 3,2 godz./rok. Wartości przyrostu sum rocznych usłonecznienia w Warszawie i Łodzi różnią się jedynie o 0,3 godz. na korzyść Łodzi.

Cecha dużej zmienności usłonecznienia uwidacznia się także w wieloletnich szeregach sezonowych sum czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego w Łodzi. Największym zakresem wahań liczby godzin ze słońcem w analizowanym 50-leciu charakteryzuje się lato – 430 godz. Wartości ekstremalne wystąpiły w odstępie 3-letnim, najniższą wartość zanotowano w 1980 r., a najwyższą w 1983 r. Wiosną największy zakres wahań, 312 godz., wystąpił w I dekadzie (największe usłonecznienie w 1953 r., najmniejsze w 1956 r.), ryc. 5.1.8. Ekstremalne sumy usłonecznienia jesienią przypadają na I (1952 r., najniższe) i V dekadę (1991 r., najwyższe), a amplituda wahań wynosi 268 godz. Najbardziej słoneczna zima wystąpiła w 1996 r., a najmniejsze usłonecznienie zanotowano w 1952 r., podobnie jak w przypadku jesieni. W latach 1951–2000 różnica liczby godzin ze słońcem zimą wyniosła 133 godz. (tab. 5.1.1, ryc. 5.1.8).



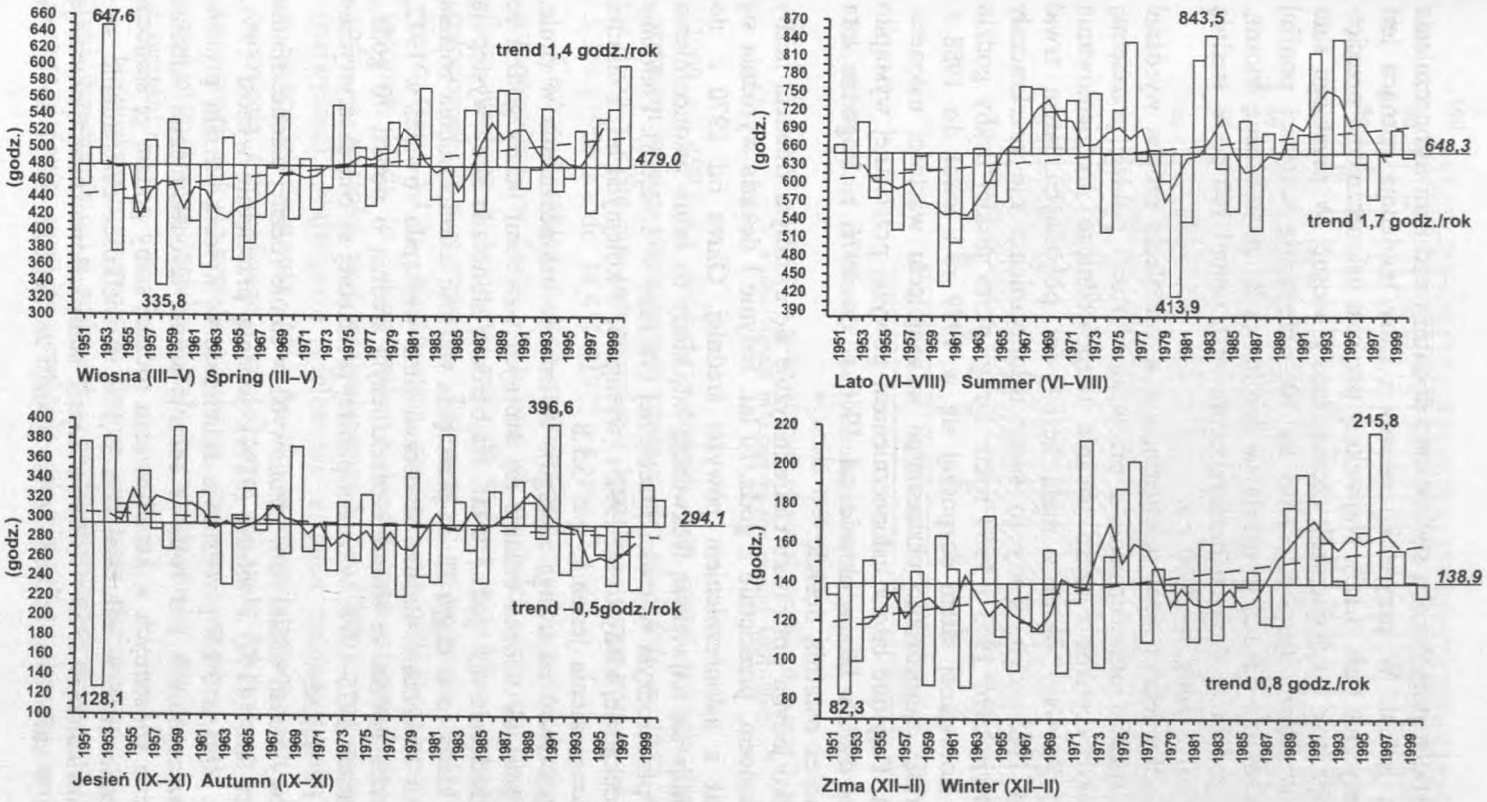
Ryc. 5.1.6. Przebieg sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Puławach i Łodzi w latach 1951–1992

Fig. 5.1.6. Course of the annual totals of actual sunshine duration in Puławy and Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.1.7. Przebieg sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Warszawie-Bielany i Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.7. Course of the annual totals of actual sunshine duration in Warszawa-Bielany and Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.1.8. Sezonowe sumy usłonecznienia rzeczywistego w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana

Fig. 5.1.8. The seasonal totals of actual sunshine duration as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź (bars). 5-year running average (solid line) and trend (dashes line)

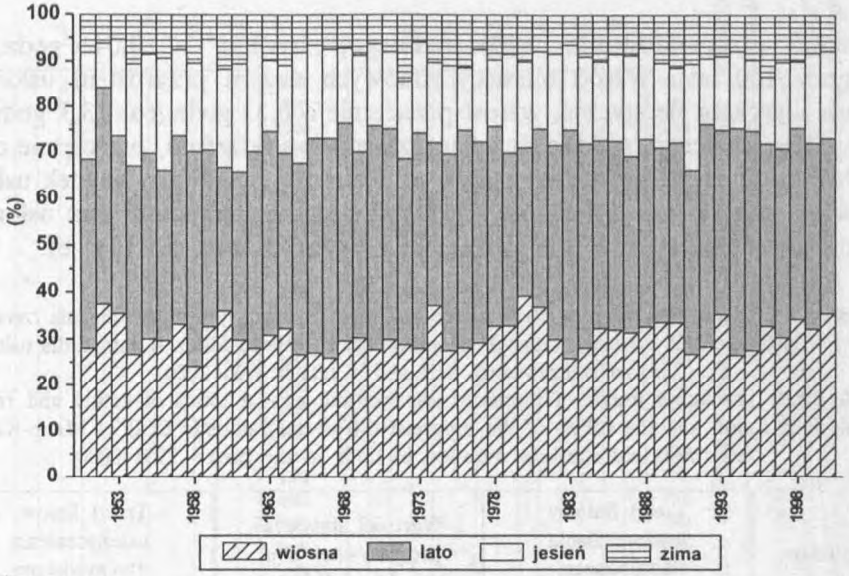
We wszystkich porach roku stwierdzono dodatni trend sum usłonecznienia z wyjątkiem jesieni. W przypadku wiosny i zimy tendencja rosnąca jest istotna statystycznie (tab. 5.1.5). Największy przyrost usłonecznienia przeciętnie o 1,8 godz./rok i 1,5 godz/rok cechuje lato i wiosnę. W przebiegu sum usłonecznienia wiosną (ryc. 5.1.8) do lat 70. przeważają wartości poniżej przeciętnej. Ostatnia dekada wyróżnia się dominacją lat ze słoneczną wiosną, kiedy liczba godzin ze słońcem przekracza nawet o ponad 100 godz. średnią wieloletnią (601,3 godz. w 2000 r.).

W przypadku letnich sum usłonecznienia w wieloleciu można wyróżnić dwa okresy spadku usłonecznienia z przewagą wartości poniżej przeciętnej oraz dwa okresy wzrostu czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego. Pierwszy okres z małą liczba dni pogodnych latem trwał od 1952 do 1965 roku, kiedy to sumy usłonecznienia nie przekraczały średniej, z wyjątkiem 1953 i 1963 roku. Drugi okres niskiej liczby godzin ze słońcem notowanej latem rozpoczął się w 1979 r. i trwał do 1988 r. W tym okresie zanotowano ekstremalne w wieloleciu wartości usłonecznienia latem. Pogodne lato z usłonecznieniem powyżej przeciętnej wystąpiło z wyjątkiem dwóch lat w okresie od 1966 r. do 1976 r. Pogodne lata cechują również ostatnią dekadę.

Jesień jako jedyna pora roku charakteryzuje się ujemnym trendem liczby godzin ze słońcem, przeciętnie 5 godz./10 lat. Jedynie I dekada wyróżnia się przewagą lat z usłonecznieniem powyżej średniej. Okres od 1970 r. do 1985 r. cechuje się największą frekwencją lat, kiedy to suma usłonecznienia jesienią nie przekroczyła wartości przeciętnej (10 razy w 15-leciu). Podobnie w ostatniej dekadzie, kiedy to od 1992 r. wystąpiło, 7 kolejnych lat, z niskimi sumami usłonecznienia jesienią, ryc. 5.1.8.

Wsród pór roku na uwagę zasługuje zmienność usłonecznienia w zimie, która podobnie jak wiosna cechuje się istotnym wzrostem liczby godzin ze słońcem, przeciętnie o 8 godz./10 lat. Najbardziej słoneczne zimy występują od 1989 r., kiedy to w ciągu 12 lat przeciętna wartość usłonecznienia została przekroczona 10-krotnie. Bardzo słoneczna zima wystąpiła również w 1972, kiedy to liczba godzin ze słońcem przekroczyła średnią o ponad 70 godz., a także w latach 1975–1976. Wartości poniżej przeciętnej są charakterystyczne dla I, II i IV dekady.

Największy średni udział sum sezonowych w sumie rocznej usłonecznienia przypada na lato (41%) i wiosnę (31%), jesienią przeciętnie wynosi 19%, a zimą 9%. Rycina 5.1.9 przedstawia zmienność w 50-leciu udziału procentowego poszczególnych pór roku w rocznej sumie usłonecznienia. Analiza przebiegu sum wiosennych w kształtowaniu rocznej sumy godzin ze słońcem wykazała zmienność w zakresie 24,1–39,1%, a wielkości ekstremalne wystąpiły odpowiednio w 1958 r. i 1980 r. Letnie sumy usłonecznienia zmieniają swój udział w całkowitej rocznej liczbie godzin ze słońcem od 31 do 49,1%



Ryc. 5.1.9. Udział procentowy sum sezonowych usłonecznienia w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.9. The contribution of seasonal totals of actual sunshine duration (in per cents) in the annual totals in Łódź in the period 1951–2000

(1960 r., 1983 r.). Udział jesiennych sum czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego zmienia się od 9,6% w 1952 r. do 24,4% w 1956 r. Zimowe usłonecznienie kształtuje sumę roczną w zakresie od 5,3% (1959 r.) do 14,4% (1972 r.), ryc. 5.1.9.

Cechą charakterystyczną wieloletniego przebiegu miesięcznych wartości usłonecznienia w Łodzi, podobnie jak wartości rocznych i sezonowych, są duże wahania z roku na rok. W 50-leciu największą amplitudą wahań usłonecznienia rzeczywistego, 270 godz., i względnego, 53%, wyróżnia się lipiec (tab. 5.1.1). Najmniejszą zmiennością usłonecznienia cechuje się listopad, kiedy to zakres wahań usłonecznienia rzeczywistego wynosił 70 godz., a wartości ekstremalne wystąpiły w 1952 r. (najniższe) i 1994 r. (najwyższe). Największa wieloletnia różnica usłonecznienia względnego w listopadzie wynosiła 26%. Analiza tendencji miesięcznych wartości usłonecznienia rzeczywistego i względnego wykazała ich wzrost we wszystkich miesiącach roku z wyjątkiem marca, czerwca i września (tab. 5.1.5). Istotność statystyczna trendu została potwierdzona w styczniu, maju, sierpniu i wrześniu.

Największym przyrostem liczby godzin ze słońcem w roku cechuje się maj, przeciętnie o 1,6 godz./rok, a także sierpień, przeciętnie 0,96 godz./rok. Latem jedynie czerwiec wyróżnia się niewielką ujemną tendencją czasu

trwania promieniowania bezpośredniego, średnio o 0,04 godz./rok (4 godz./100 lat). Wśród miesięcy zimowych dużym przyrostem usłonecznienia wyróżnia się styczeń, wzrost przeciętnie o 0,33 godz./rok (3,3 godz./10 lat). Silna tendencja spadkowa usłonecznienia we wrześniu, przeciętnie o 0,7 godz./rok (7 godz./10 lat) ma wpływ na wcześniej opisywany spadek usłonecznienia jesienią (tab. 5.1.5). Największymi skrajnymi trendami sum usłonecznienia wyróżniają się w wieloleciu maj i wrzesień (ryc. 5.1.10a, b).

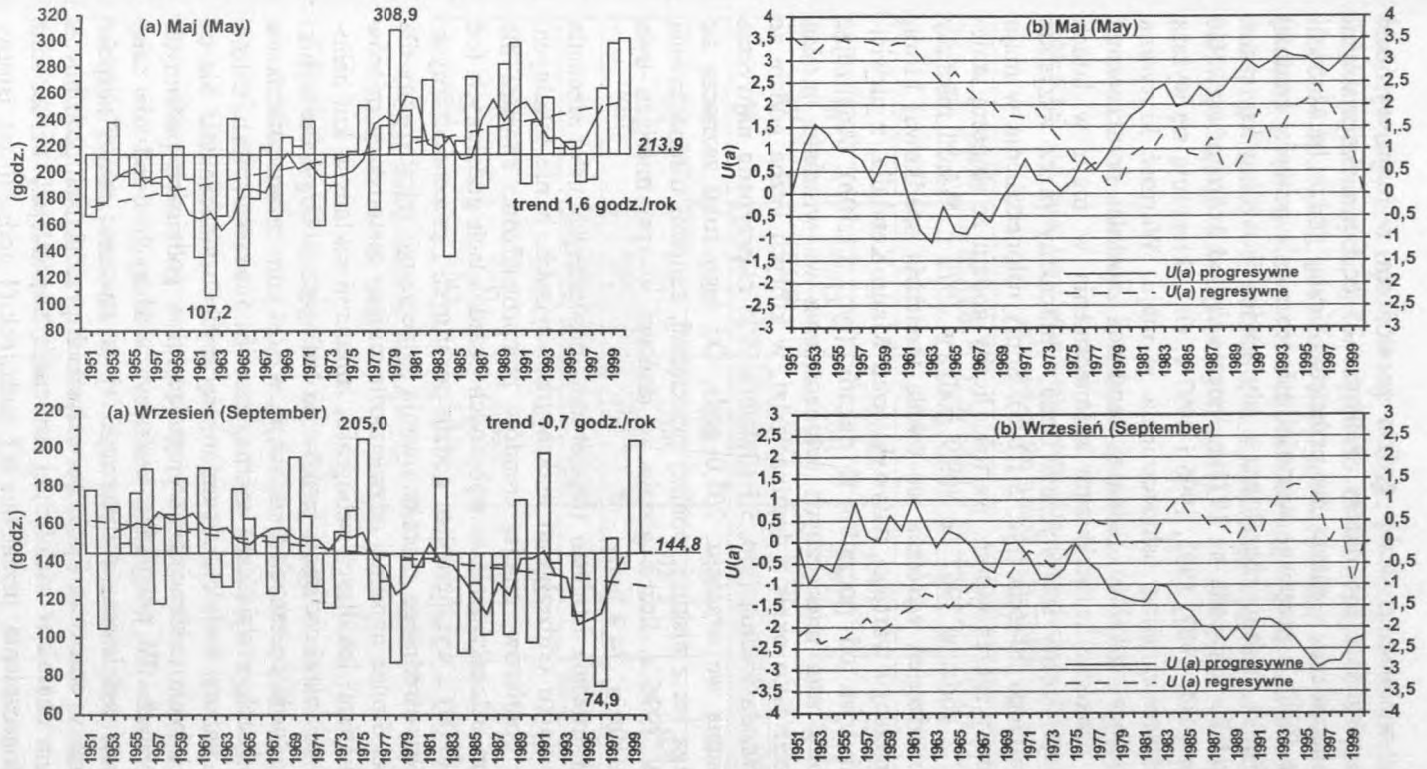
Tabela 5.1.5. Trendy liniowe sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego i względnego oraz wartości statystyki progresywnej $U(a)$ testu Mann-Kendalla dla usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Table 5.1.5. The linear trends of monthly, seasonal and annual totals of actual and relative sunshine duration and the values of the progressive (forward) statistic $U(a)$ of Mann-Kendall test for actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Miesiące	Trend liniowy usłonecznienia względnego (w %)	Wartości statystyki progresywnej $U(a)$ testu Mann-Kendalla	Trend liniowy usłonecznienia rzeczywistego (w godz./rok)
I	0,33*	2,03*	0,13*
II	0,30	1,87	0,11
III	–0,18	–0,3	–0,05
IV	0,01	0,09	0,0003
V	1,62*	3,56*	0,33*
VI	–0,04	–0,31	–0,01
VII	0,83	1,30	0,16
VIII	0,96*	2,25*	0,21*
IX	–0,70*	–2,22*	–0,18*
X	0,05	0,39	0,02
XI	0,18	0,81	0,07
XII	0,16	1,38	0,06
III–V	1,46*	2,63*	0,11*
VI–VIII	1,76	1,71	0,12
IX–XI	–0,46	–1,46	–0,04
XII–II	0,80*	2,40*	0,10*
Rok	3,55*	2,20*	0,08*

* Trend istotny statystycznie na poziomie 5%.

* Significant trend on 5% level.



Ryc. 5.1.10. (a) Sumy usłonecznienia rzeczywistego w maju i we wrześniu w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana. (b) Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla sum usłonecznienia rzeczywistego w maju i we wrześniu w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.10. (a) The totals of actual sunshine duration in May and September as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź (bars). 5-year running average (solid line) and trend (dashes line). (b) The course of the sequence values of Mann-Kendall test for totals of actual sunshine duration in May and September. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$

W przebiegu wieloletnim liczby godzin ze słońcem w maju wyróżnić można dwa charakterystyczne okresy. Pierwsze 25-lecie z niekorzystnymi warunkami usłonecznienia – niższą niż przeciętna liczbą godzin ze słońcem – oraz lata 1976–2000, z przewagą wartości usłonecznienia powyżej średniej (rys. 5.1.10a). Punkt zmiany charakteru i siły tendencji według kryterium testu Mann-Kendalla przypada na 1977 r., począwszy od którego wszystkie lata z wyjątkiem 1984, 1987, 1991, 1996 i 1997 r. charakteryzują się wyższą od średniej wieloletniej sumą usłonecznienia w maju. Wartość krytyczna testu potwierdzająca trwałość rosnącej tendencji została przekroczona w 1981 r., co oznacza, że serię sum usłonecznienia w maju w latach 1951–1981 cechuje istotny statystycznie trend, umacniany przez wszystkie kolejne lata ostatniego 20-lecia (ryc. 5.1.10b). Sumy usłonecznienia w maju charakteryzuje duży zakres wahań, wartości liczby godzin ze słońcem zmieniały się od 107,2 godz. w 1962 do 308,9 godz. w 1979 r. Wśród miesięcy jesiennych tylko wrzesień wyróżnia się trwałą tendencja spadkową, która, jak wynika z przebiegu wartości statystyki testu Mann-Kendalla, z niewielkimi wahaniami trwa od początku II dekady (ryc. 5.1.10b). Analizując wieloletni przebieg sum miesięcznych usłonecznienia we wrześniu, można wyróżnić I 25-lecie jako okres z dominacją lat, w których liczba godzin ze słońcem przewyższała średnią (ryc. 5.1.10a). Na 1975 r. przypada najwyższa suma usłonecznienia we wrześniu, 205,0 godz. Od tego roku zaznacza się wyraźna przewaga lat z niskimi, poniżej przeciętnej, sumami usłonecznienia we wrześniu. W 1996 r. liczba godzin ze słońcem w tym miesiącu była najniższa w wieloleciu, 74,9 godz.

W celu potwierdzenia istnienia trendu sum miesięcznych usłonecznienia w Łodzi jako wyniku oddziaływań makrocyrkulacyjnych, a nie lokalnych, m.in. metodyki pomiarów, analizę trendów przeprowadzono również dla miesięcznych sum usłonecznienia w wybranych przedziałach godzinnych (od godz. 10.00 do 15.00) z wykluczeniem godzin porannych i przedwieczornych. Czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego rejestrowany dla niskich wysokości Słońca najsilniej odzwierciedla zmiany metodyki pomiarów związanej ze zmianami lokalizacji heliografu, zmianami szklanych kul heliograficznych czy zmianami rodzajów pasków na heliogramy. Uzyskane wyniki potwierdzają zgodność opisanych trendów, tj. wzrost sum usłonecznienia we wszystkich miesiącach z wyjątkiem marca, czerwca i września (tab. 5.1.6), co oznacza, że zmiany wieloletnie sum miesięcznych usłonecznienia nie są uwarunkowane jedynie tendencjami występującymi w godzinach porannych czy przedwieczornych. W przypadku miesięcy, w których trend dla całej serii obserwacyjnej był istotny statystycznie, tj. w styczniu, maju, sierpniu i we wrześniu oraz w czerwcu i lipcu, we wszystkich przedziałach godzinnych występuje ten sam charakter wieloletniej tendencji. Najsilniejszy wzrost sum miesięcznych usłonecznienia, przeciętnie 0,1 godz./rok (1 godz./10 lat, istotny

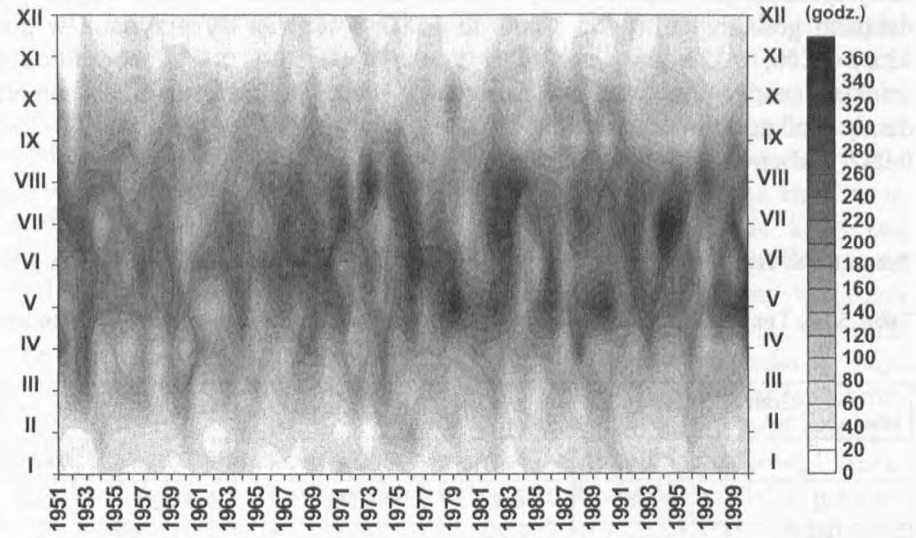
statystycznie), jest rejestrowany w maju we wszystkich analizowanych przedziałach godzinnych, tj. od 10.00 do 15.00, a największy przypada w godz. 12.00–13.00, 0,123 godz./rok (1,23 godz./10 lat, tab. 5.1.6). Najsilniejszym trendem spadkowym w roku charakteryzują się wszystkie analizowane przedziały godzinne we wrześniu, z kulminacją spadku w godz. 14.00–15.00, 0,097 godz./rok (istotny statystycznie).

Tabela 5.1.6. Trend liniowy sum miesięcznych usłonecznienia w wybranych przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000
Table 5.1.6. The linear trend of monthly totals of sunshine duration in selected hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000

Godz. / Miesiące	10.00–11.00	11.00–12.00	12.00–13.00	13.00–14.00	14.00–15.00
I	0,019	0,016	0,012	0,035	0,095*
II	0,016	–0,009	–0,001	0,0002	0,024
III	–0,015	–0,041	–0,027	–0,018	–0,011
IV	0,008	0,009	0,002	–0,026	–0,021
V	0,119*	0,121*	0,123*	0,104*	0,080*
VI	–0,033	–0,032	–0,048	–0,041	–0,039
VII	0,027	0,010	0,011	0,009	0,001
VIII	0,072*	0,054	0,039	0,048	0,062
IX	–0,064*	–0,046	–0,058	–0,072*	–0,097*
X	0,010	–0,004	–0,004	–0,015	–0,002
XI	0,011	–0,0001	0,007	0,036	0,058*
XII	–0,013	–0,12	0,012	0,038	0,075*

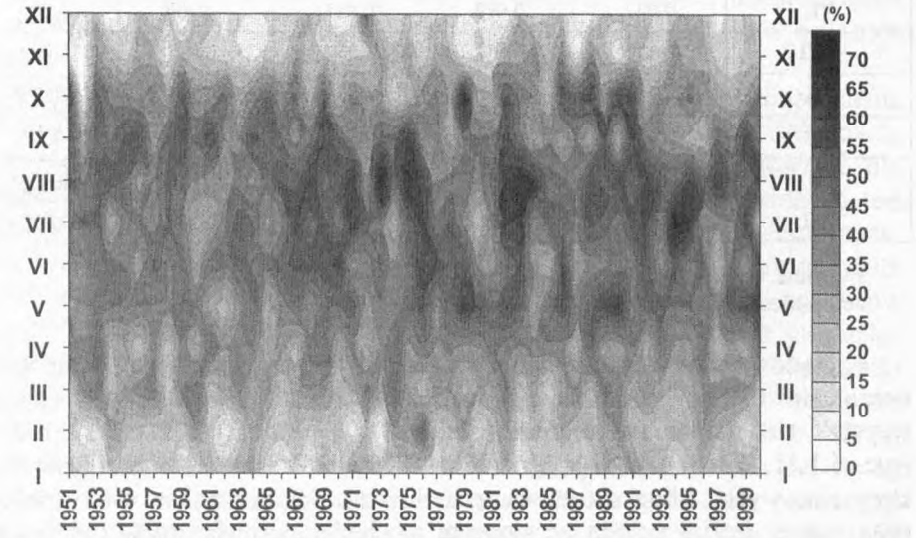
* Istotne statystycznie na poziomie 5%.
* Significant on 5% level.

Poglądową ilustracją wieloletnich tendencji wartości miesięcznych usłonecznienia rzeczywistego i względnego są roczne przebiegi tych charakterystyk przedstawione dla wszystkich lat badanego okresu 1951–2000 (ryc. 5.1.11, 5.1.12). Ogólną prawidłowością jest niskie usłonecznienie miesięcy zimowych, silnie skorelowane z dużym zachmurzeniem tych miesięcy oraz wzrost liczby godzin ze słońcem w ciepłej połowie roku. Cechą charakterystyczną rocznego przebiegu wartości miesięcznych usłonecznienia w wieloleciu jest duża zmienność z roku na rok – lata pochmurne sąsiadują z latami bardzo słonecznymi.



Ryc. 5.1.11. Roczny przebieg miesięcznych sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.11. Annual course of the monthly totals of the actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.1.12. Roczny przebieg miesięcznych wartości usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.12. Annual course of the monthly values of the relative sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Niestabilność liczby godzin ze słońcem w analizowanym 50-leciu, charakterystyczna dla wszystkich miesięcy w roku, jest wyrazem typowych cech klimatu Polski. Duża frekwencja (ok. 60% dni w roku) frontów atmosferycznych przemieszczających się nad obszarem kraju i związane z nimi zachmurzenie wpływają na zmniejszenie i dużą zmienność liczby godzin ze słońcem. Najbardziej sprzyjające dopływowi bezpośredniego promieniowania słonecznego są okresy pogody bezfrontowej związanej z antycyklonalnymi typami cyrkulacji.

Uzupełnieniem przedstawionego opisu zmienności szeregów rocznych, sezonowych i miesięcznych sum usłonecznienia są podstawowe charakterystyki statystyczne, przedstawione w tab. 5.1.7.

Analiza współczynnika asymetrii wykazała niską dodatnią asymetrię dla wszystkich sum miesięcznych usłonecznienia z wyjątkiem czerwca i września, świadczącą o tendencji grupowania wartości w niskich przedziałach liczby godzin ze słońcem. Największą skośnością empirycznego rozkładu sum usłonecznienia wyróżnia się grudzień. Szeregi sezonowych sum usłonecznienia cechują się niską dodatnią asymetrią wiosną i zimą oraz asymetrią ujemną latem i jesienią. Roczne sumy usłonecznienia charakteryzuje niska asymetria dodatnia.

Współczynnik kurtozy, ilustrujący koncentrację wartości wokół średniej wieloletniej, przyjmuje bardzo niskie wartości dla wszystkich analizowanych szeregów sum usłonecznienia z wyjątkiem grudnia. Szereg rocznych sum usłonecznienia, podobnie jak sezonowych z wyjątkiem jesieni, cechuje kurtoza ujemna, świadcząca o rozproszeniu wartości wokół średniej. Wśród sum miesięcznych liczby godzin ze słońcem kurtoza dodatnia cechuje luty, lipiec, październik i grudzień (tab. 5.1.7).

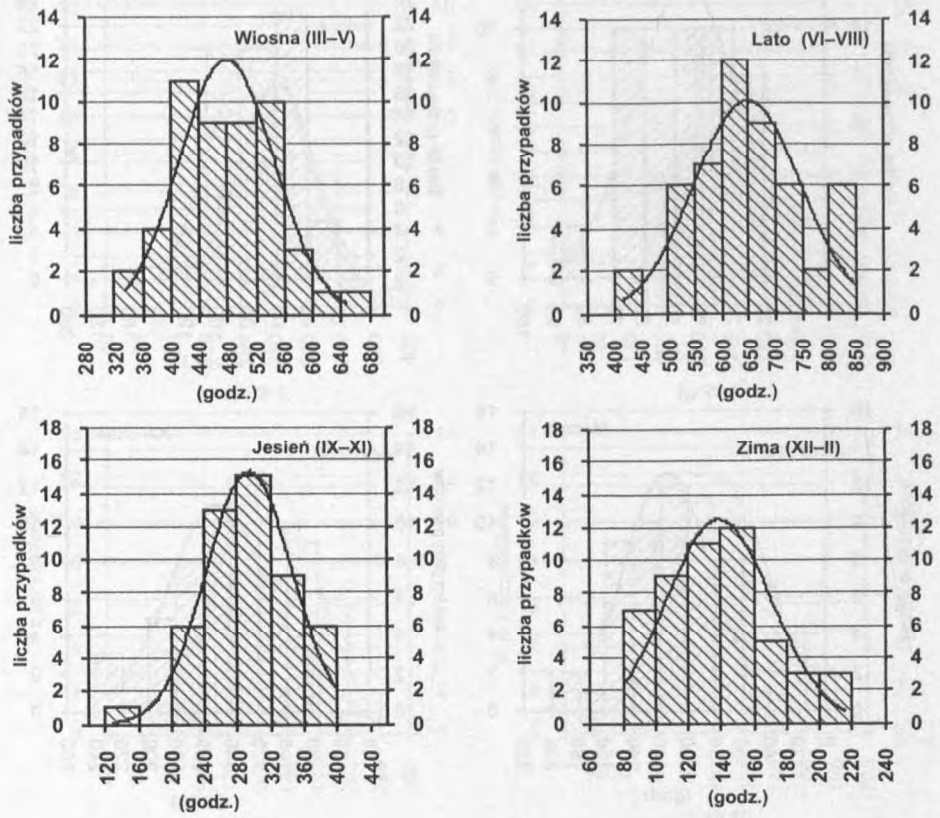
Empiryczne rozkłady sezonowych sum usłonecznienia w latach 1951–2000 spełniają kryterium rozkładu normalnego (test Shapiro-Wilka, na poziomie istotności 5%). Wiosną najczęściej rejestrowane są sumy usłonecznienia w przedziale 400–440 godz., latem dominują sumy usłonecznienia z przedziału 600–650 godz., jesienią najczęściej pojawia się liczba godzin ze słońcem w granicach 280–320 godz., a zimą największą frekwencją cechują się sumy usłonecznienia z przedziału 140–160 godz. (ryc. 5.1.7). Kryterium normalności rozkładu zostało spełnione w przypadku wszystkich szeregów sum miesięcznych z wyjątkiem grudnia (ryc. 5.1.14, 5.1.15). Empiryczny rozkład sum usłonecznienia w grudniu wyróżnia się najwyższą wśród miesięcy asymetrią prawostronną (współczynnik asymetrii $A = 1{,}43$) i znacznym skupieniem wartości wokół średniej, o czym świadczy wysoka dodatnia wartość współczynnika kurtozy, 5,57 (tab. 5.1.7).

Tabela 5.1.7. Podstawowe charakterystyki statystyczne sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Table 5.1.7. The basic statistical characteristics of the monthly, the seasonal and the annual totals of actual sunshine duration in the period 1951–2000

Miesiące	Średnie	Mediana	Maksimum	Minimum	Zakres wahań	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności (%)	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	Skośność	Kurtoza
I	45,7	45,6	86,0	17,6	68,4	17,2	37,6	31,0	59,1	0,27	–0,63
II	60,3	57,7	133,0	14,7	118,3	23,8	39,5	47,6	73,2	0,66	0,81
III	115,2	116,2	186,9	50,1	136,8	31,9	27,7	93,4	138,2	0,18	–0,47
IV	149,9	147,2	226,7	81,4	145,3	36,2	24,1	126,1	171,0	0,28	–0,39
V	213,9	218,9	308,9	107,2	201,7	46,3	21,6	182,8	239,2	0,07	–0,22
VI	215,8	215,7	301,4	114,9	186,5	43,8	20,3	185,6	253,0	–0,18	–0,47
VII	220,5	219,3	367,9	98,0	269,9	57,0	25,9	185,0	257,3	0,11	0,06
VIII	212,1	212,5	321,7	139,0	182,7	42,6	20,1	176,7	241,0	0,35	–0,32
IX	144,8	143,1	205,0	74,9	130,1	33,1	22,9	121,5	169,5	–0,08	–0,73
X	105,2	100,7	187,3	15,5	171,8	34,9	33,2	78,9	129,2	0,15	0,02
XI	44,1	42,0	77,6	7,6	70,0	18,2	41,3	30,3	59,1	0,18	–0,79
XII	32,9	32,7	96,5	7,7	88,8	14,9	45,3	23,0	40,5	1,43	5,57
III–V	479,0	476,0	647,6	335,8	311,8	67,3	14,1	426,4	533,1	0,07	–0,32
VI–VIII	648,3	643,9	843,5	413,9	429,6	99,9	15,4	584,5	716,6	–0,003	–0,08
IX–XI	294,1	293,3	396,6	128,1	268,5	32,3	11,0	257,6	325,9	–0,24	0,79
XII–II	138,9	136,8	215,8	82,3	133,5	52,8	38,0	115,8	156,3	0,43	–0,09
Rok	1560,4	1578,6	1921,4	1275,1	646,3	153,9	9,9	1416,3	1700,5	0,07	–0,84

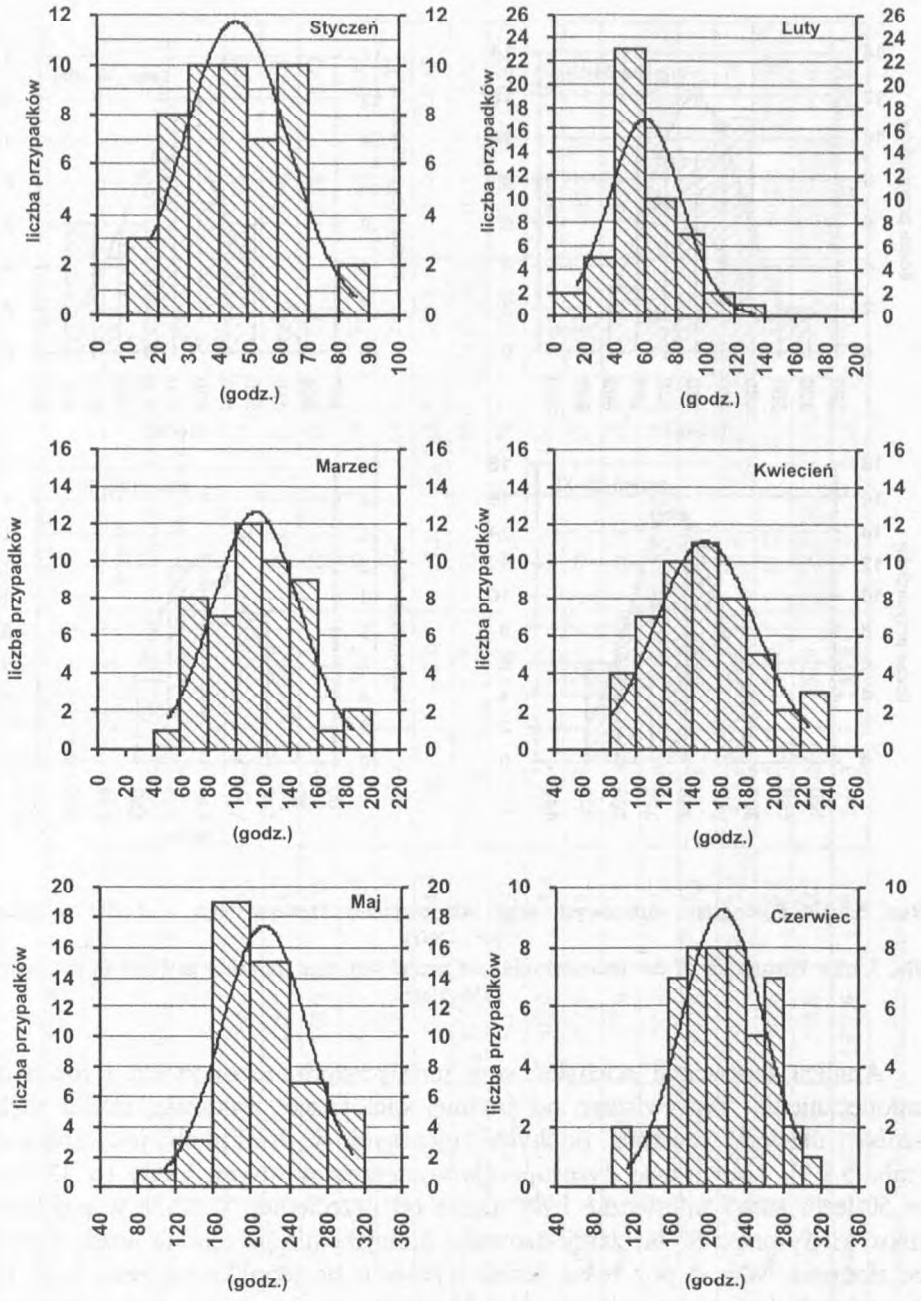
wartości najwyższe (maximum values).



Ryc. 5.1.13. Histogram sezonowych sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

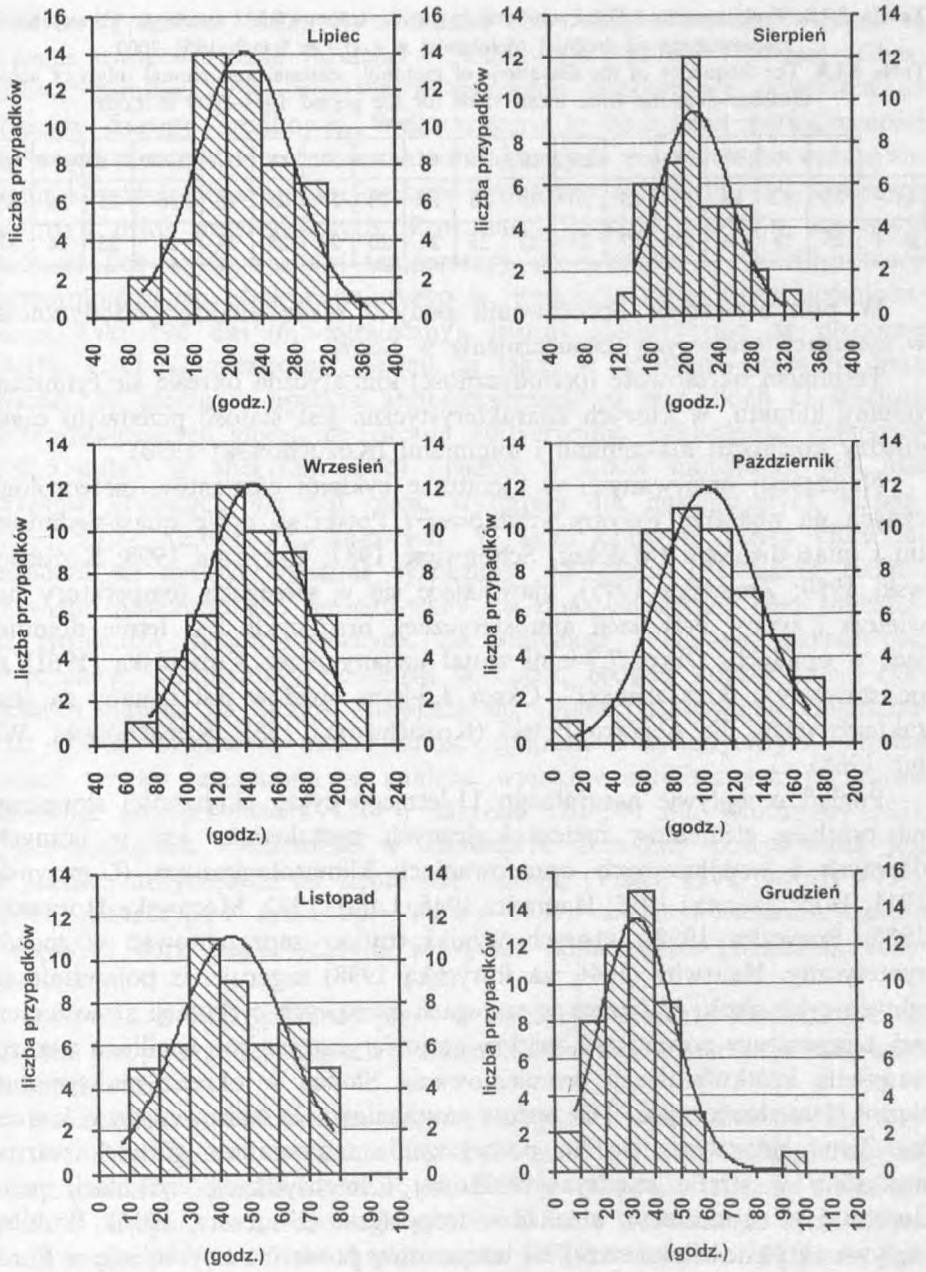
Fig. 5.1.13. Histogram of the seasonal totals of actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Analiza frekwencji odchyleń sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego od średniej wieloletniej wykazała, iż dla większości miesięcy częstość odchyleń ujemnych i dodatnich jest zbliżona (tab. 5.1.8). Największe dysproporcje występują w lutym, kiedy to 32 razy w 50-leciu sumy miesięczne były niższe od przeciętnej, a także w październiku, kiedy przez 30 lat zarejestrowano mniejszą niż przeciętna liczbę godzin ze słońcem. Wśród pór roku, jesień wyróżnia się jednakową frekwencją lat pogodnych (usłonecznienie powyżej średniej) i pochmurnych (usłonecznienie poniżej średniej) w 50-leciu. W pozostałych sezonach odchylenia ujemne wystąpiły 26 razy w wieloleciu (tab. 5.1.8).



Ryc. 5.1.14. Histogram miesięcznych (I–VI) sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.14. Histogram of the monthly totals of actual sunshine duration (I–VI) in Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.1.15. Histogram miesięcznych (VII–XII) sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.1.15. Histogram of the monthly totals of actual sunshine duration (VII–XII) in Łódź in the period 1951–2000

Tabela 5.1.8. Frekwencja odchyleń sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000

Table 5.1.8. The frequency of the deviations of monthly, seasonal and annual totals of actual sunshine duration from mean value for the period 1951–2000 in Łódź

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II	Rok
in –	25	32	24	27	23	25	25	25	26	30	27	25	26	26	25	26	23
in +	25	18	26	23	27	25	25	25	24	20	23	25	24	24	25	24	27

W prezentowanym opracowaniu podjęto także analizę periodyczności w szeregach czasowych usłonecznienia w Łodzi.

Terminem okresowość (periodyczność) klimatyczna określa się rytmiczne zmiany klimatu, w których charakterystyczna jest stałość przedziału czasu między kolejnymi maksimami i minimami (Kożuchowski 1990).

Najczęściej opisywanymi w literaturze cyklami elementów meteorologicznych na obszarze Europy Środkowej i Polski są cykle quasi-siedmioletni i quasi-dwuletni (Malcher, Schönwiese 1987; Boryczka 1998; Kożuchowski 1989; Żmudzka 1995), ujawniające się w szeregach temperatury powietrza i typów cyrkulacji atmosferycznej, oraz cykle 2–3 letnie dominujące w opadach. Okres 7,7-letni został uznany przez Kuziemską (1961) za podstawowy „okres ziemski". Okres 3,5-letni opadów jest uznany za charakterystyczny dla obszaru Polski (Kożuchowski 1985; Kożuchowski, Wibig 1988).

Pogląd o wpływie naturalnego 11-letniego cyklu aktywności słonecznej na przebieg elementów meteorologicznych postulowany jest w licznych, dawnych i współczesnych opracowaniach klimatologicznych (Gorczyński 1911, 1915; Merecki 1915, Haurwitz 1946, Lamb 1982, Morawska-Horawska 1985, Boryczka 1998), których wyniki trudno zaprezentować w sposób syntetyczny. Haurwitz (1946, za Boryczką 1998) sugeruje, iż pojawienie się silnych cykli około 11-letnich w szeregach czasowych cyrkulacji atmosferycznej, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych jest wynikiem wzrostu natężenia krótkofalowego promieniowania Słońca w okresie maksymalnej liczby plam słonecznych. Ten wzrost promieniowania emitowanego w kierunku Ziemi przyczynia się do podwyższenia temperatury górnych warstw atmosfery w strefie międzyzwrotnikowej i intensyfikację cyrkulacji południkowej w ozonosferze, a także w troposferze (Haurwitz, 1946). Problem wpływu aktywności słonecznej na temperaturę powietrza i cyrkulację w Europie podjęła w swoim opracowaniu Trepińska (1992). Analiza przebiegu średnich temperatur miesięcznych z 24 stacji europejskich i analiza pola ciśnienia w Europie ujawniała największy procent okresów o długości trwania zbliżonej do podstawowego cyklu słonecznego, mieszczących się w przedziale

9–13 lat (Trepińska 1992). Ze zmianami aktywności słonecznej wiązane są również cykle 7,7-letnie (Malcher i Schönwiese 1987) i 7,8-letnie (Charvatova, Strestik 1994) wykryte w szeregach temperatury powietrza na obszarze Europy Środkowej. Wykorzystanie w badaniach periodyczności dobowych wartości elementów meteorologicznych zaowocowało opracowaniami klimatologicznymi dotyczącymi problematyki poszukiwań krótszych od roku cykli przyrodniczych. Fortuniak (2000b) wykrył w szeregach średnich dobowych wartości temperatury powietrza z 11 polskich stacji meteorologicznych obok popularnego w literaturze cyklu quasi-siedmioletniego, cykl 196 dni (6,5-miesięczny), istotny statystycznie na poziomie 99,9%. Cykl 6,5-miesięczny ujawnił się także w przebiegu prężności pary wodnej. W szeregach opadów atmosferycznych na wszystkich 11 stacjach meteorologicznych dominuje istotna statystycznie cykliczność półroczna (182,5 dnia). W spektrum mocy opadów w Łodzi największe piki, dla okresów krótszych niż pół roku, wystąpiły dla następujących wahań: 5,96-; 55,7-; 12,63-; 32,3-dniowych. W skali czasowej rzędu kilku lat zaznacza się niezbyt wyraźnie cykliczność 4,89-letnia (Fortuniak 2000b). W wielu opracowaniach prezentowany jest quasi-miesięczny cykl zmienności elementów meteorologicznych. Za istnieniem 27-dniowej okresowości w przebiegu temperatury powietrza w Łodzi, będącej konsekwencją cyklicznych zjawisk na Słońcu opowiada się swoim opracowaniu Degirmendžić (1995). 27-dniowa periodyczność związana z synodycznym okresem rotacji została ujawniona w analizie wyników satelitarnych pomiarów natężenia promieniowania UV w zakresie 120–300 nm (Rottman 1983). Quasi-miesięczna cykliczność w atmosferze ziemskiej postulowana jest w pracach dotyczących fal ciepła nad Europą (Visser 1949; Witiels 1959), zmian makrotypów cyrkulacji (Witiels 1959), ciśnienia atmosferycznego i częstości burz magnetycznych w rejonie Spitsbergenu (Witinskij, Sazonow 1976).

Zarówno w obcojęzycznej, jak i w polskiej literaturze klimatologicznej niewiele jest prac podejmujących problem okresowości w szeregach czasowych usłonecznienia.

Badania okresowości zmian usłonecznienia na stacjach Kraków, Zakopane, Wrocław, Śnieżka w latach 1901–1980 metodą funkcji autokorelacyjnej przeprowadziła Dubicka i Limanówka (1994), wykazując istnienie 4-letniego cyklu w dopływie bezpośredniego promieniowania słonecznego. Problem periodyczności podjęła Morawska-Horawska (1985) w analizie 120-letniej krakowskiej serii usłonecznienia (lata 1861–1980), stwierdzając następujące, istotne statystycznie periodyczności: 22,2 roku, 10,3 roku, 3,6 roku. Okresowości 22,2 i 10,3 zostały uznane za wynik wpływu 11-letniego cyklu aktywności słonecznej, a cykl 3,6 roku pokrył się z okresowymi zmianami zachmurzenia

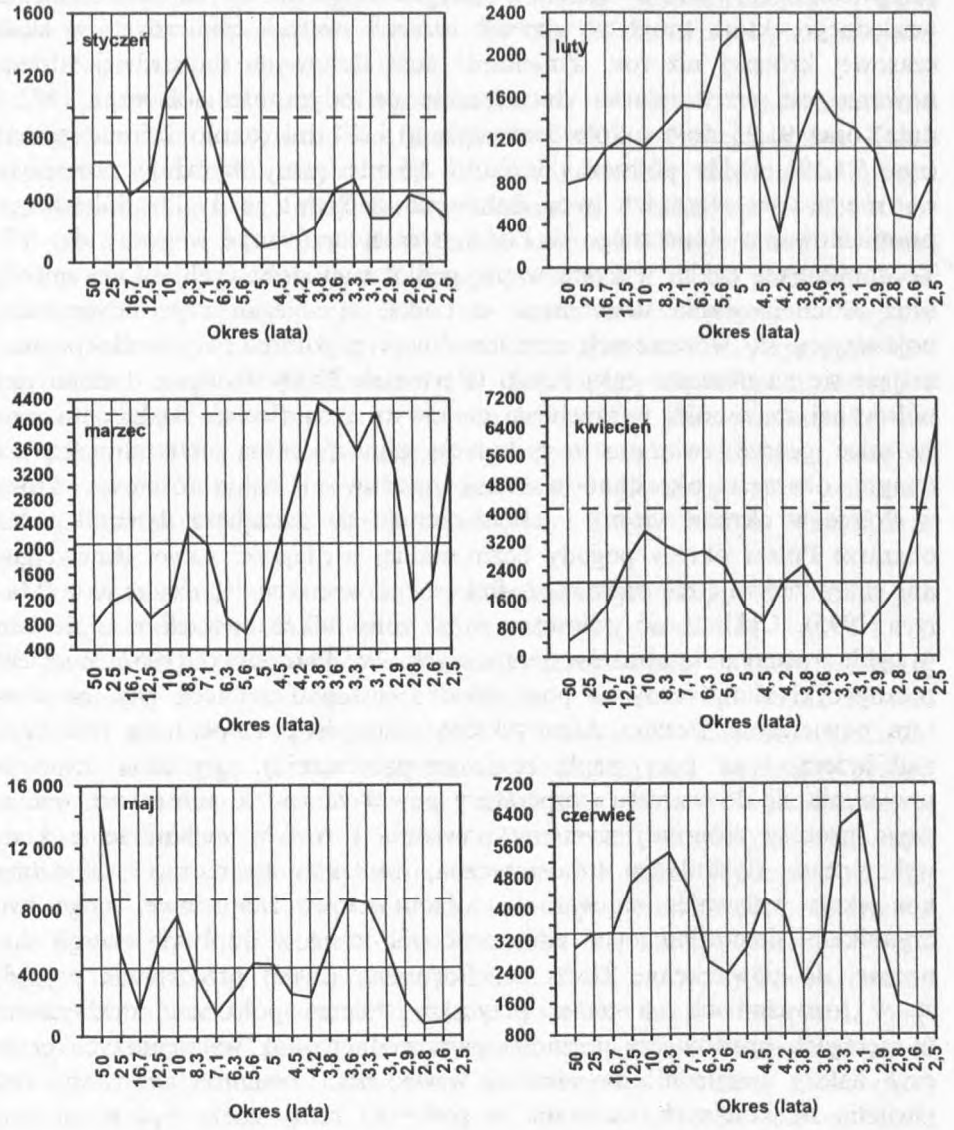
w Krakowie. Korelacja usłonecznienia z liczbą plam słonecznych wykazała zależność negatywną. Największa wartość współczynnika korelacji ($r = -0,34$) pojawia się dla opóźnienienia 8 lat w stosunku do maksimum plam słonecznych (Morawska-Horawska 1985).

W prezentowanym opracowaniu widmo mocy zostało wyznaczone dla szeregów sum rocznych, miesięcznych i dobowych usłonecznienia w Łodzi z okresu 1951–2000 przy użyciu klasycznej metody Blackmana-Tukeya transformaty Furiera funkcji autokowariancyjnej. W analizie wyników badań zastosowano 5-procentowe kryterium istotności statystycznej. W świetle tego kryterium dominujące oscylacje w widmach mocy poszczególnych miesięcy w większości przypadków nie są istotne statystycznie. Wyjątek stanowi pik okresowości 8,3 roku, przekraczający wartości krytyczne białego szumu na poziomie istotności 5%, pojawiający się w spektrum mocy sum usłonecznienia w styczniu, sierpniu i wrześniu oraz wahania 2,5 roku, 2,8 roku i 3,8 roku ujawniające się odpowiednio w kwietniu, listopadzie i marcu. Wymienione periodyczności nie ujawniają się w widmach pozostałych miesięcy, co może świadczyć o przypadkowym charakterze tych wahań.

Porównując widma mocy dla poszczególnych miesięcy, zauważalny jest brak wyraźnego podobieństwa w ich przebiegu (ryc. 5.1.16, ryc. 5.1.17). W styczniu największy udział w wariancji szeregu mają wahania 8,3 roku, podczas gdy w lutym dominują wahania 5-letnie i 3,6 roku. Marzec wyróżnia się dominacją wahań 3,8 i 3,1 roku. W kwietniu spektrum empiryczne cechuje się największym odchyleniem od poziomu białego szumu dla okresu 2,5 roku. W maju największy udział w wariancji szeregu ma okresowość 3,3 i 3,1 roku. W czerwcu największe odchylenia spektrum empirycznego przypadają na okres 3,1 roku. W lipcu dominują wahania 6,3 roku. W sierpniu i wrześniu największy udział w wariancji szeregu ma cykl 8,3 roku. W październiku najwięcej wariancji opisują okresy 3,8; 3,6 i 2,8 roku. W listopadzie poziom krytyczny białego szumu przekracza okres 2,8 roku. W grudniu, podobnie jak w listopadzie, największe odchylenia spektrum empirycznego przypadają na periodyczność 2,8 roku. Analizowane widma mocy nie ujawniają wyraźnej dominującej periodyczności w miesiącach jednej pory roku – spektrum nie wykazuje wyraźnych cech podobieństwa, co przemawia za przypadkowością opisywanych wahań.

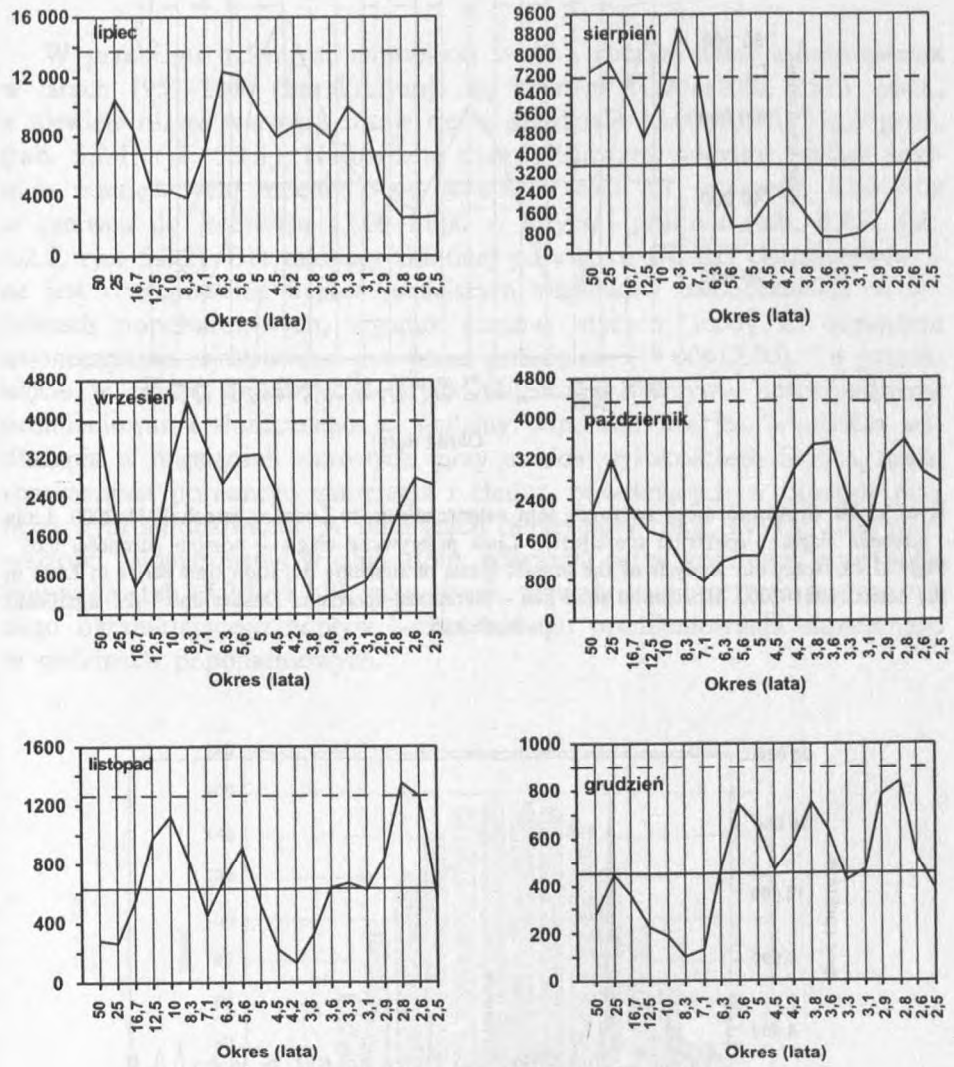
W widmie mocy dla szeregu rocznych sum usłonecznienia największy udział w wariancji całego szeregu mają wahania 3,3 roku oraz 6,3, oba cykle nie spełniają założonego kryterium istotności (ryc. 5.1.18).

Próbę poszukiwań periodyczności w wieloletnich zmianach usłonecznienia przeprowadzono także w oparciu o szereg wartości dobowych usłonecznienia względnego, które mogłyby ujawnić istnienie wahań cyklicznych w skali czasowej krótszej niż rok. Zmienność sum dobowych najbardziej zdominowana jest przez istotną statystycznie periodyczność półroczną (182,5 dnia) oraz 91,25 dnia (około 3-miesięczną) i 73 dni (około 2,5-miesięczną) (ryc. 5.1.19). Cykle półroczny i około 2,5-miesięczny wyraźnie zaznaczyły się również w szeregach sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w Łodzi, szerzej omówione w podrozdz. 6.2. Te dominujące cykle, wykryte w przypadku sum dobowych usłonecznienia oraz promieniowania słonecznego w Łodzi, są zbieżne z periodycznością pojawiającą się w szeregach sum opadów i prężności pary wodnej ujawniające się na obszarze całej Polski (Fortuniak 2000). Istnienie dominującej półrocznej zmienności w przebiegu czasowym tych elementów klimatu może mieć genezę związaną z cyrkulacją atmosferyczną determinującą na danym obszarze określone warunki opadowe i wilgotnościowe, która w Polsce w okresie wiosny i jesieni cechuje się najsłabszą dynamiką. Na obszarze Polski okresy pogody bezfrontalnej o długości nawet do 3 tygodni charakteryzują się największą frekwencją w marcu i październiku (Martyn 1995). Cykliczność półroczna może mieć także związek z istnieniem w cyklu rocznym kontrastów termicznych. W. Parczewski (1962) podzielił roczny cykl klimatyczny na porę chłodną (listopad–marzec), gdy temperatura powierzchni Oceanu Atlantyckiego przewyższa temperaturę powietrza nad lądem, i na porę ciepłą (kwiecień–październik), gdy silna insolacja przyczynia się do wzrostu temperatury powietrza nad kontynentem, wzmagając procesy pionowej wymiany powietrza i rozwój zachmurzenia konwekcyjnego. Cyrkulacja atmosferyczna, kontrasty termiczne, wzmożona konwekcja wpływając na warunki wilgotnościowe i opadowe, mogą być czynnikami determinującymi zmienność półroczną w dopływie energii słonecznej do powierzchni Ziemi. K. Fortuniak (2000) przedstawia pogląd, że w rozważaniach na temat przyczyn istnienia półrocznej cykliczności w szeregach opadów czy prężności pary wodnej obok wymienionych przyczyn należy uwzględnić nieliniowość wewnętrznej dynamiki atmosfery. Pojawianie się kolejnych harmonik w spektrum mocy może być rezultatem wewnętrznej dynamiki układu. Autor sugeruje, że piki cykliczności półrocznej w przebiegu rocznym nie zawsze oznaczają wtórne maksimum i minimum, mogą być one jedynie wykorzystane do bliższej rekonstrukcji badanego szeregu.

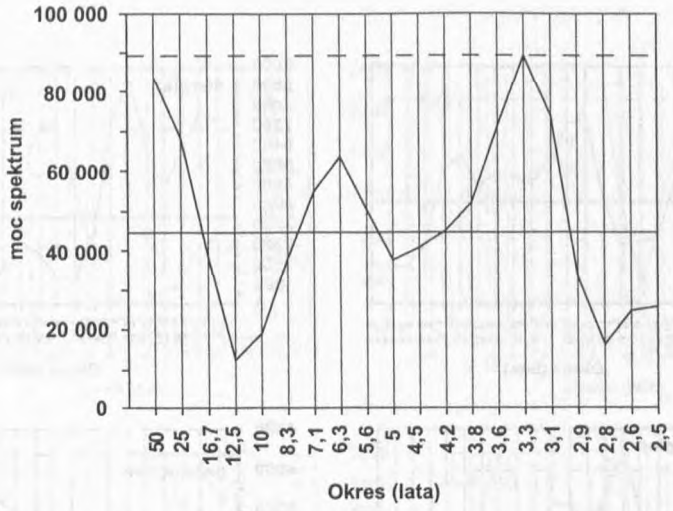


Ryc. 5.1.16. Spektrum mocy usłonecznienia (I–VI) w Łodzi w latach 1951–2000. Linia pozioma ciągła – spektrum teoretyczne. Linia przerywana ciągła – poziom istotności 0,05

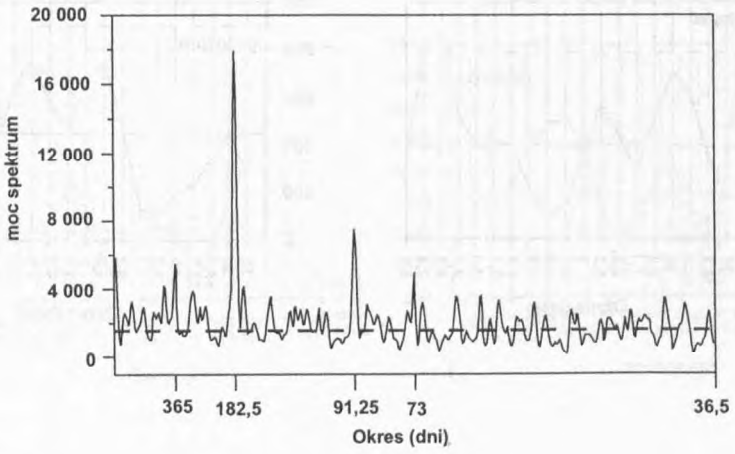
Fig. 5.1.16. Spectrum analysis of sunshine duration time series (I–VI) in Łódź in the period 1951–2000. Horizontal solid line – theoretical spectrum. Dashes line – the significant level 0.05



Ryc. 5.1.17. Spektrum mocy usłonecznienia (VII–XII) w Łodzi w latach 1951–2000. Linia pozioma ciągła – spektrum teoretyczne. Linia przerywana ciągła – poziom istotności 0,05
Fig. 5.1.17. Spectrum analysis of sunshine duration time series (VII–XII) in Łódź in the period 1951–2000. Horizontal solid line – theoretical spectrum. Dashes line – the significant level 0.05



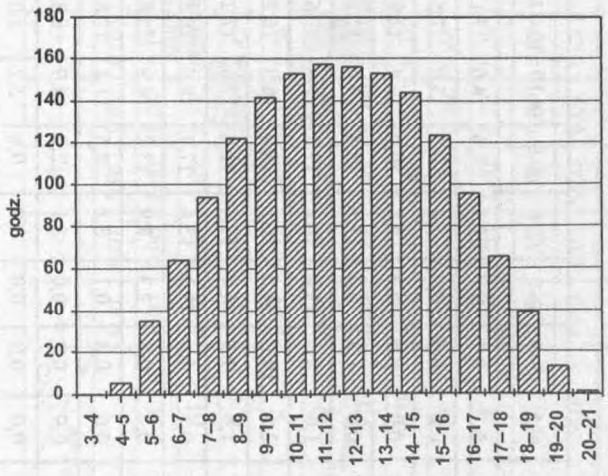
Ryc. 5.1.18. Spektrum mocy rocznych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000. Linia pozioma ciągła – spektrum teoretyczne. Linia przerywana ciągła – poziom istotności 0,05
Fig. 5.1.18. Spectrum analysis of the annual totals of sunshine duration time series in Łódź in the period 1951–2000. Horizontal solid line – theoretical spectrum. Dashes line – the significant level 0.05



Ryc. 5.1.19. Spektrum mocy dobowych wartości usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1951–2000. Linia przerywana – poziom istotności 0,05
Fig. 5.1.19. Spectrum analysis of the daily values of relative sunshine duration time series in Łódź in the period 1951–2000. Dashes line – the significant level 0.05

5.2. PRZEBIEG DOBOWY USŁONECZNIENIA

W przebiegu dziennym największą średnią roczną sumą usłonecznienia w latach 1951–2000 charakteryzuje się interwał 11.00–12.00, 157,1 godz., a niewiele niższe wartości notuje się w przedziale 12.00–13.00, 155,9 godz. (tab. 5.2.1, ryc. 5.2.1). Najbardziej uprzywilejowane godziny według średnich miesięcznych zmieniają się w ciągu roku od interwału 8.00–9.00 w czerwcu do interwału 13.00–14.00 w lutym i grudniu (tab. 5.2.1, tab. 5.2.2, ryc. 5.2.2). Dla miesięcy chłodnej pory roku (X–III) charakterystyczne jest występowanie najkorzystniejszych warunków usłonecznienia w godzinach popołudniowych, wyjątek stanowi styczeń, kiedy to najwyższe usłonecznienie rejestrowane jest przed południem (11.00–12.00). To przesunięcie w czasie najkorzystniejszych warunków dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego na godziny popołudniowe jest wynikiem wydłużenia w miesiącach zimowych, przy niskich wysokościach Słońca, czasu rozpraszania porannego zamglenia i chmur, powstających w procesie nocnego wypromieniowania. W miesiącach ciepłej pory roku (IV–IX) najwyższe wartości usłonecznienia w ciągu doby pojawiają się w godzinach przedpołudniowych (tab. 5.2.1, 5.2.2), jako wynik rozwoju zachmurzenia konwekcyjnego ograniczającego dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego w godzinach popołudniowych.



Ryc. 5.2.1. Sumy roczne usłonecznienia rzeczywistego w przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000

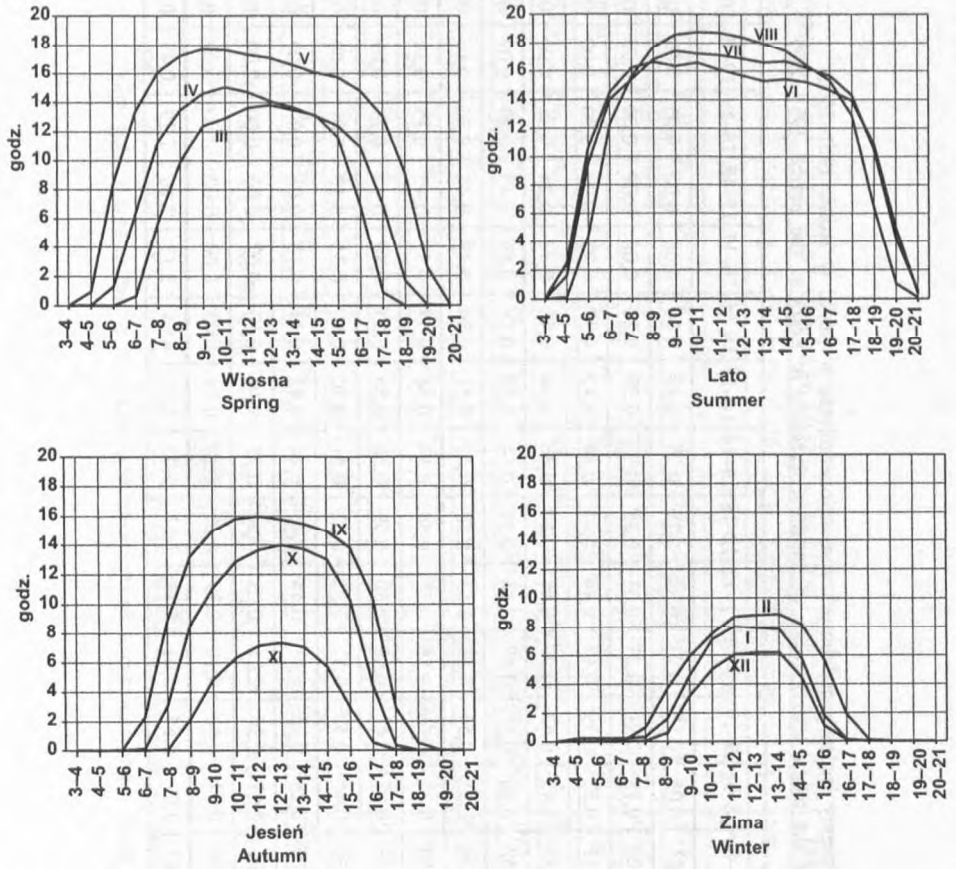
Fig. 5.2.1. The annual totals of actual sunshine duration in hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000

Tabela 5.2.1. Średnie miesięczne i roczne sumy usłonecznienia w przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000
Table 5.2.1. The monthly and the annual mean of sunshine duration in hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21	Suma
I	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	1,6	4,6	7,1	8,0	7,9	7,8	5,8	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	45,7
II	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,7	5,9	7,5	8,7	8,8	8,9	8,2	5,7	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	60,3
III	0,0	0,0	0,0	0,7	5,8	10,0	12,4	12,9	13,7	13,8	13,5	13,2	11,6	6,9	0,9	0,0	0,0	0,0	115,2
IV	0,0	0,0	1,3	6,4	11,3	13,5	14,6	15,1	14,7	14,1	13,7	13,1	12,4	11,0	7,0	1,7	0,1	0,0	149,9
V	0,0	1,0	8,4	13,4	16,1	17,2	17,7	17,6	17,3	17,1	16,6	16,1	15,8	14,8	13,1	9,1	2,6	0,1	213,9
VI	0,1	2,5	10,6	14,5	16,2	16,6	16,3	16,5	16,1	15,7	15,3	15,4	15,1	14,7	13,9	10,9	4,9	0,4	215,8
VII	0,0	1,6	9,5	14,0	15,4	16,8	17,4	17,2	17,1	16,9	16,6	16,7	16,2	15,7	14,3	10,5	4,2	0,5	220,5
VIII	0,0	0,1	4,4	12,3	15,6	17,7	18,6	18,8	18,7	18,4	18,0	17,4	16,3	15,3	12,9	6,4	1,0	0,1	212,1
IX	0,0	0,0	0,0	2,3	8,9	13,2	14,9	15,8	16,0	15,7	15,4	14,9	13,8	10,4	2,9	0,5	0,0	0,0	144,8
X	0,0	0,0	0,0	0,1	3,1	8,6	11,1	12,8	13,6	14,0	13,7	13,0	10,3	4,4	0,4	0,0	0,0	0,0	105,2
XI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,2	4,9	6,3	7,1	7,3	7,0	5,7	2,9	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	44,1
XII	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	3,2	5,0	6,0	6,2	6,2	4,5	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	32,9
Rok	0,1	5,4	34,4	63,9	93,7	121,7	141,7	152,8	157,1	155,9	152,7	143,9	123,0	95,7	65,5	39,1	12,8	1,1	1560,4

Tabela 5.2.2. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000
Table 5.2.2. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Godz. / M-ce	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,15	0,23	0,26	0,25	0,25	0,19	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,03	0,13	0,21	0,27	0,31	0,31	0,32	0,29	0,20	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,02	0,19	0,32	0,39	0,42	0,44	0,45	0,44	0,42	0,37	0,22	0,03	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,05	0,22	0,38	0,45	0,49	0,50	0,49	0,47	0,46	0,44	0,42	0,37	0,24	0,06	0,00	0,00
V	0,03	0,28	0,43	0,52	0,56	0,57	0,57	0,56	0,55	0,54	0,52	0,51	0,48	0,43	0,29	0,09	0,00
VI	0,08	0,35	0,48	0,54	0,55	0,54	0,55	0,53	0,52	0,51	0,51	0,50	0,49	0,46	0,36	0,16	0,01
VII	0,05	0,31	0,45	0,50	0,54	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,52	0,51	0,47	0,35	0,14	0,02
VIII	0,00	0,14	0,40	0,51	0,57	0,60	0,61	0,60	0,59	0,58	0,56	0,53	0,49	0,42	0,21	0,03	0,00
IX	0,00	0,00	0,07	0,30	0,44	0,50	0,52	0,53	0,52	0,51	0,50	0,46	0,35	0,10	0,01	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,10	0,28	0,36	0,41	0,44	0,45	0,44	0,42	0,34	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,16	0,21	0,23	0,24	0,23	0,19	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,10	0,16	0,19	0,20	0,20	0,14	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,18	1,14	2,09	3,07	3,99	4,65	5,01	5,14	5,11	5,02	4,72	4,04	3,13	2,16	1,29	0,43	0,03



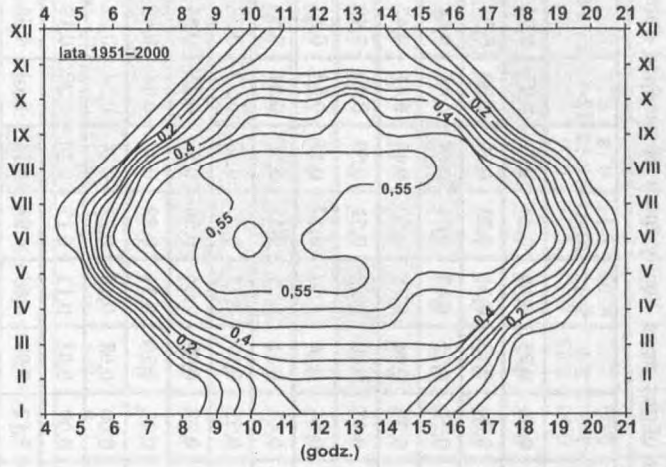
Ryc. 5.2.2. Sumy miesięczne usłonecznienia rzeczywistego w przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.2.2. The monthly totals of actual sunshine duration in hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000

Powyższe prawidłowości ilustruje przebieg roczny izoplet średnich godzinnych wartości usłonecznienia (ryc. 5.2.3). Ogólny kształt izoplet zdeterminowany jest zmianą długości dnia w ciągu roku, a według generalnej prawidłowości w godzinach okołopołudniowych występują najkorzystniejsze warunki usłonecznienia. Największe zagęszczenie izoplet jest charakterystyczne dla godzin porannych i przedwieczornych – wynik występowania zamglenia oraz wpływu efektu kulisowego, związanego z zachmurzeniem nietworzącym ciągłej powłoki (Słomka 1957, Kłysik 1974). W miesiącach letnich kształt izoplet wyraźnie odzwierciedla modyfikujący wpływ zachmurzenia konwek-

cyjnego – najwyższe wartości usłonecznienia notowane są w godzinach przedpołudniowych.

Pod względem liczby godzin, w których czas dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego przewyższa 0,5 godz., wyróżnia się lipiec, kiedy to wymieniona wartość została osiągnięta średnio przez 10 godz. (od godz. 7.00 do godz. 17.00). Miesiącami uprzywilejowanymi w tym aspekcie są również maj, czerwiec i sierpień, kiedy to przez 9 godz. dziennie (od godz. 7.00 do godz. 16.00) czas trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego średnio przewyższa 0,5 godz. Najwyższą w roku wartość usłonecznienia w przedziale godzinnym zarejestrowano w sierpniu, średnio 0,61 godz. (10.00–11.00), a w interwale 9.00–10.00 i 11.00–12.00 słońce świeciło przez 0,6 godz. (tab. 5.2.2, ryc. 5.2.3). Najniższa maksymalna wartość usłonecznienia w ciągu doby przypada w grudniu w interwale 12.00–14.00, średnio 0,2 godz.



Ryc. 5.2.3. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.2.3. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1951–2000

W celu zobrazowania zmian przebiegu dobowego usłonecznienia w wieloleciu 1951–2000 analizę przeprowadzono z podziałem na 25-lecia i dekady. W przebiegu dziennym według średnich rocznych sum usłonecznienia, najwyższe wartości przypadają w obu 25-leciach przed południem (11.00–12.00). Obserwuje się przyrost usłonecznienia w latach 1976–2000 w stosunku do lat 1951–1975. Średnie sumy roczne powyżej 5 godz. pojawiają się w latach 1951–1975 tylko w dwóch przedziałach godzinnych, tj. 11.00–12.00 i 12.00–13.00, podczas gdy w drugim 25-leciu notowane są od godz. 10.00 do godz. 14.00 (tab. 5.2.3, 5.2.4).

Tabela 5.2.3. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–1975
Table 5.2.3. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1951–1975

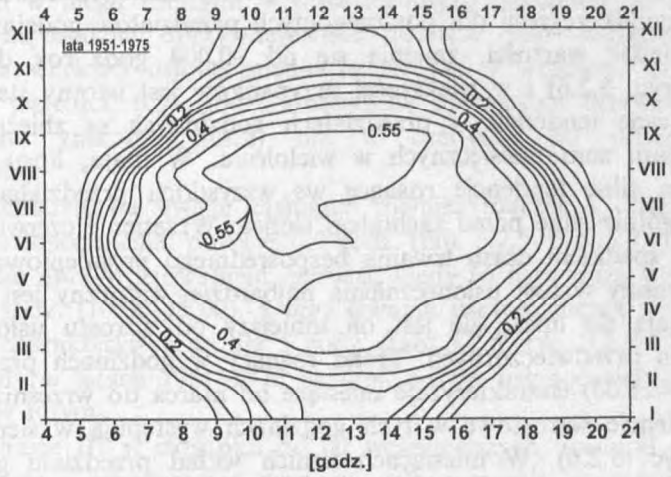
Godz. / M-ce	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,15	0,23	0,27	0,27	0,25	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,04	0,13	0,21	0,25	0,30	0,30	0,31	0,27	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,03	0,22	0,35	0,42	0,44	0,47	0,46	0,44	0,43	0,38	0,20	0,01	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,04	0,23	0,39	0,44	0,48	0,50	0,48	0,47	0,47	0,44	0,41	0,35	0,19	0,03	0,00	0,00
V	0,02	0,24	0,38	0,47	0,50	0,52	0,51	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,44	0,36	0,20	0,03	0,00
VI	0,05	0,35	0,46	0,54	0,56	0,54	0,57	0,55	0,55	0,53	0,53	0,52	0,50	0,47	0,32	0,09	0,00
VII	0,04	0,28	0,43	0,47	0,51	0,55	0,55	0,55	0,54	0,53	0,54	0,52	0,50	0,45	0,27	0,07	0,01
VIII	0,00	0,16	0,42	0,52	0,57	0,59	0,59	0,59	0,59	0,57	0,54	0,50	0,47	0,37	0,13	0,01	0,00
IX	0,00	0,00	0,11	0,37	0,48	0,54	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,51	0,37	0,08	0,00	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,12	0,28	0,34	0,39	0,43	0,44	0,44	0,40	0,31	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,18	0,22	0,24	0,24	0,22	0,17	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	0,17	0,20	0,20	0,19	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,11	1,08	2,06	3,12	3,99	4,63	4,98	5,14	5,10	4,98	4,62	3,86	2,96	1,93	0,97	0,20	0,01

Tabela 5.2.4. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1976–2000
Table 5.2.4. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1976–2000

Godz. / M-ce	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,16	0,23	0,25	0,25	0,26	0,23	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	0,22	0,28	0,32	0,33	0,33	0,32	0,25	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,01	0,15	0,30	0,37	0,39	0,41	0,43	0,43	0,42	0,36	0,24	0,05	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,05	0,21	0,38	0,46	0,50	0,50	0,50	0,48	0,45	0,43	0,42	0,38	0,28	0,09	0,00	0,00
V	0,04	0,31	0,49	0,57	0,61	0,63	0,62	0,62	0,61	0,59	0,56	0,54	0,52	0,49	0,39	0,15	0,01
VI	0,12	0,36	0,49	0,53	0,55	0,55	0,54	0,52	0,50	0,49	0,50	0,49	0,47	0,46	0,40	0,24	0,02
VII	0,07	0,34	0,48	0,53	0,57	0,58	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	0,51	0,49	0,42	0,21	0,03
VIII	0,00	0,12	0,38	0,50	0,58	0,61	0,62	0,62	0,60	0,59	0,58	0,55	0,52	0,46	0,29	0,06	0,01
IX	0,00	0,00	0,04	0,23	0,39	0,45	0,49	0,50	0,49	0,47	0,44	0,41	0,32	0,12	0,03	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,08	0,28	0,38	0,43	0,45	0,46	0,46	0,44	0,38	0,19	0,02	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,15	0,21	0,24	0,25	0,25	0,21	0,14	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,09	0,15	0,18	0,20	0,21	0,17	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,25	1,19	2,12	3,03	3,99	4,67	5,04	5,16	5,15	5,06	4,83	4,22	3,30	2,38	1,62	0,66	0,06

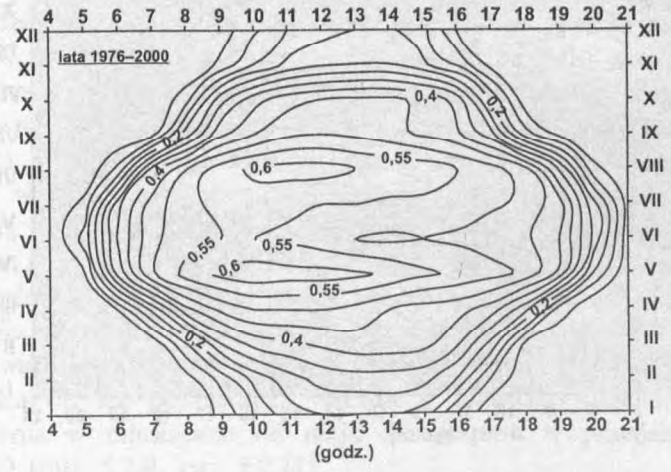
Wśród wartości miesięcznych znacznym przyrostem usłonecznienia w wieloleciu 1976–2000 cechuje się maj, kiedy to od godz. 8.00 do 13.00 wartości przekraczają 0,6 godz., oraz sierpień między godz. 9.00 i 13.00 (ryc. 5.2.4, 5.2.5). Podział na dwa 25-lecia uwidacznia duże różnice kształtu izoplet średniego dziennego usłonecznienia w biegu rocznym. Okres 1976–2000 wyróżnia się w stosunku do lat 1951–2000 dwoma maksimami rocznego przebiegu czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego. W drugim 25-leciu pierwszorzędne maksimum usłonecznienia przypada na maj, 0,63 godz. (9.00–10.00), drugorzędne maksimum pojawia się w sierpniu, 0,62 godz. (10.00–11.00, 11.00–12.00). W okresie 1951–1975 najwyższe usłonecznienie notowano w sierpniu od godz. 9.00–13.00, 0,59 godz. Wyraźnymi zmianami w przebiegu dobowym cechuje się usłonecznienie w czerwcu, kiedy to w latach 1951–1975 rejestrowane są wyższe wartości w stosunku do drugiego 25-lecia, 0,57 godz., i przypadają one w interwale późniejszym, tj. 10.00–11.00. W latach 1976–2000 w czerwcu obserwowane jest przesunięcie najbardziej uprzywilejowanego przedziału godzinnego pod względem czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego na godz. 8.00–9.00, co jest efektem intensyfikacji procesów konwekcyjnych nad miastem.

Wyraźną cechą przebiegu dobowego usłonecznienia w drugim 25-leciu jest wydłużenie czasu jego rejestracji w godzinach po wschodzie i przed zachodem słońca. Przyczyną wzrostu usłonecznienia w godzinach porannych i przedwieczornych może być zmniejszenie częstości pojawiania się zamglenia w wyniku zwiększenia obszaru zabudowanego wokół stacji Łódź-Lublinek. Drugim hipotetycznym czynnikiem odpowiedzialnym za zwiększenie czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego w godzinach przedwieczornych jest intensyfikacja prądów wstępujących nad miastem (Fortuniak 1994, 1995). Przy niskim położeniu słońca chmury konwekcyjne nad miastem nie utrudniają dopływu bezpośredniego promieniowania do heliografu zlokalizowanego na południowo-zachodnich peryferiach Łodzi, a rozwój silnych prądów konwekcyjnych nad centrum aglomeracji przyczynia się do powstania prądów zstępujących na obrzeżach Łodzi, hamujących rozwój zachmurzenia i powstanie rozpogodzenia przed zachodem Słońca. Najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem wydłużania się czasu rejestracji usłonecznienia w godzinach przedwieczornych mogą być zmiany o charakterze makrocyrkulacyjnym zachodzące w strukturze zachmurzenia. Analiza wieloletnich tendencji oraz charakteru zachmurzenia w poszczególnych terminach obserwacyjnych przeprowadzona przez J. Wibig (2004) dla stacji Łódź-Lublinek w latach 1951–2000 ujawniła rosnący trend zachmurzenia konwekcyjnego i spadkowy trend zachmurzenia warstwowego w terminie wieczornym. Takie tendencje obserwowane są także w innych regionach Polski, m.in. w Poznaniu i Krakowie oraz na obszarze Europy Środkowej.



Ryc. 5.2.4. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1951–1975

Fig. 5.2.4. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1951–1975

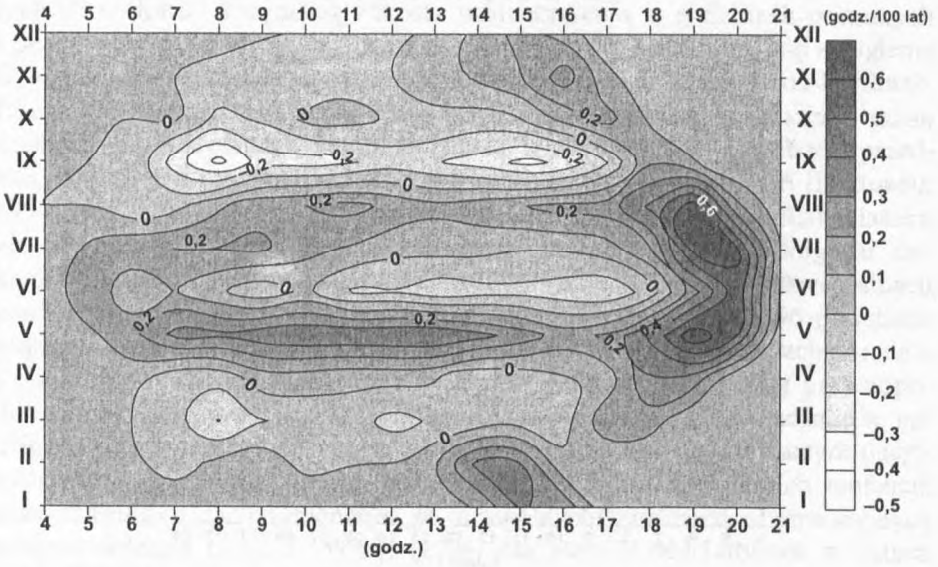


Ryc. 5.2.5. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1976–2000

Fig. 5.2.5. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1976–2000

Dla zobrazowania zmienności przebiegu dobowego usłonecznienia w 50-leciu przeprowadzono analizę tendencji wartości godzinnych usłonecznienia.

Współczynnik regresji dla poszczególnych przedziałów godzinnych przyjmuje niewielkie wartości, zmienia się od –0,004 godz./rok do +0,006 godz./rok (ryc. 5.2.6) i w większości przypadków jest istotny statystycznie. Zaobserwowane tendencje w przedziałach godzinnych są zbieżne z ogólnymi trendami sum miesięcznych w wieloleciu. W maju, lipcu i sierpniu widoczne są silne tendencje rosnące we wszystkich przedziałach godzinnych, szczególnie silne przed zachodem słońca. Wrzesień i czerwiec charakteryzuje się spadkiem czasu trwania bezpośredniego promieniowania słonecznego. Poranny wzrost usłonecznienia najbardziej widoczny jest w miesiącach od maja do lipca, ale jest on mniejszy od wzrostu usłonecznienia w godzinach przedwieczornych. Trend rosnący w godzinach przedwieczornych (18.00–21.00) charakteryzuje miesiące od marca do września, a najsilniejsze tendencje wzrostowe w tych godzinach występują w sierpniu (tab. 5.2.10ab, ryc. 5.2.6). W miesiącach letnich wkład przedziału godzinnego 18.00–21.00 w przeciętny przyrost sumy miesięcznej w analizowanym 50-leciu wynosi ok. 30%.



Ryc. 5.2.6. Trendy liniowe godzinnych wartości usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000 (w godz./100 lat)

Fig. 5.2.6. The linear trend of hourly values of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 (in hour per 100 years)

Opisane tendencje usłonecznienia ilustrują izoplety średnich wartości godzinnych w biegu rocznym w poszczególnych dekadach 50-lecia. W dekadzie I najbardziej uprzywilejowane miesiące pod względem średnich godzinnych wartości usłonecznienia to sierpień i wrzesień. We wrześniu, najwyższe wartości, 0,56 godz., dorównują maksimum czerwcowemu i są rejestrowane znacznie dłużej niż w czerwcu, bo przez 5 godz. (10.00–15.00).

W I dekadzie na uwagę zasługuje również marzec z długim okresem rejestracji usłonecznienia, powyżej 0,4 godz. (tab. 5.2.5, ryc. 5.2.7). Dekada II wyróżnia się uprzywilejowaniem czerwca, kiedy to najwyższa wartość osiągnęła 0,62 godz. (10.00–11.00), a czas trwania usłonecznienia wynoszący 0,6 godz. był charakterystyczny dla 5 godz. (tab. 5.2.6, ryc. 5.2.8). W stosunku do I dekady w latach 1961–1970 nastąpił wzrost usłonecznienia w styczniu i spadek w lutym.

W dekadzie III w stosunku do lat wcześniejszych, nastąpił wzrost wartości w maju i zmniejszenie wartości usłonecznienia w czerwcu i lipcu. W przebiegu rocznym izoplet średnich godzinnych wartości czasu trwania promieniowania bezpośredniego zaznaczają się dwa maksima wynoszące 0,6 godz., w maju w godz. 8.00–9.00 oraz w sierpniu w godz. 10.00–11.00 i 11.00–12.00. W latach 1971–1980 wzrósł czas rejestracji usłonecznienia w godzinach porannych i przedwieczornych (tab. 5.2.7, ryc. 5.2.9).

IV dekada przynosi nasilenie tendencji z dekady poprzedniej – wzrost usłonecznienia w maju i sierpniu, najwyższe wartości wynoszą w obu miesiącach przeciętnie 0,65 godz. i są rejestrowane w przypadku maja w godz. 10.00–11.00, a w przypadku sierpnia od godz. 10.00 do godz.12.00. Tendencje wzrostu usłonecznienia w godzinach po wschodzie i przed zachodem słońca również uległy nasileniu w IV dekadzie (tab. 5.2.8., ryc. 5.2.10). Pogłębieniu uległ także, w stosunku do dekad poprzednich, spadek usłonecznienia w czerwcu.

Ostatnią dekadę (lata 1991–2000) cechuje wyraźny wzrost usłonecznienia w grudniu i styczniu. W przebiegu izoplet widoczne są dwa maksima roczne, podobnie jak w poprzedniej dekadzie (ryc. 5.2.11). Niewielkiemu zmniejszeniu uległ deficyt usłonecznienia w czerwcu, poprzez wzrost najwyższych wartości notowanych w tym miesiącu w stosunku do dekady IV. W stosunku do lat poprzednich dekada V charakteryzuje się wzrostem usłonecznienia w miesiącach od maja do sierpnia w przedziałach godz. 18.00–21.00 (tab. 5.2.9, ryc. 5.2.11).

Tabela 5.2.5. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–1960
Table 5.2.5. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1951–1960

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,20	0,24	0,24	0,21	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,14	0,22	0,27	0,34	0,34	0,34	0,30	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,00	0,05	0,26	0,37	0,43	0,44	0,49	0,50	0,48	0,45	0,43	0,24	0,02	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,00	0,04	0,22	0,38	0,43	0,46	0,49	0,48	0,46	0,48	0,44	0,42	0,36	0,18	0,02	0,00	0,00
V	0,00	0,01	0,22	0,38	0,47	0,50	0,52	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,52	0,47	0,38	0,20	0,02	0,00
VI	0,00	0,01	0,27	0,40	0,49	0,54	0,51	0,56	0,55	0,54	0,50	0,53	0,53	0,50	0,44	0,26	0,02	0,00
VII	0,00	0,01	0,23	0,39	0,42	0,47	0,53	0,53	0,55	0,55	0,54	0,54	0,52	0,49	0,44	0,21	0,01	0,00
VIII	0,00	0,00	0,11	0,36	0,47	0,53	0,58	0,58	0,58	0,60	0,58	0,55	0,50	0,47	0,33	0,07	0,00	0,00
IX	0,00	0,00	0,00	0,12	0,38	0,49	0,54	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,52	0,38	0,07	0,00	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,31	0,37	0,42	0,48	0,48	0,47	0,42	0,30	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,19	0,24	0,25	0,27	0,23	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,10	0,18	0,21	0,19	0,16	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,0	0,03	0,87	1,91	3,05	3,93	4,57	5,00	5,23	5,25	5,07	4,64	3,90	3,01	1,86	0,76	0,06	0,00

Tabela 5.2.6. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1961–1970
Table 5.2.6. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1961–1970

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,16	0,25	0,27	0,26	0,25	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,11	0,18	0,22	0,27	0,28	0,28	0,26	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,00	0,03	0,18	0,30	0,37	0,39	0,42	0,40	0,38	0,39	0,34	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,00	0,05	0,24	0,38	0,44	0,48	0,50	0,48	0,48	0,47	0,46	0,41	0,36	0,19	0,03	0,00	0,00
V	0,00	0,03	0,26	0,38	0,45	0,46	0,49	0,49	0,48	0,46	0,45	0,45	0,46	0,42	0,36	0,18	0,02	0,00
VI	0,00	0,07	0,45	0,54	0,60	0,61	0,60	0,62	0,59	0,59	0,60	0,59	0,54	0,54	0,51	0,38	0,12	0,00
VII	0,00	0,04	0,33	0,46	0,51	0,54	0,56	0,55	0,54	0,53	0,54	0,54	0,54	0,52	0,46	0,27	0,06	0,00
VIII	0,00	0,01	0,20	0,43	0,51	0,54	0,55	0,55	0,56	0,53	0,52	0,49	0,46	0,42	0,32	0,10	0,00	0,00
IX	0,00	0,00	0,00	0,12	0,37	0,48	0,55	0,56	0,57	0,57	0,55	0,55	0,50	0,34	0,07	0,00	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,01	0,12	0,29	0,36	0,41	0,43	0,46	0,47	0,43	0,34	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,15	0,18	0,21	0,19	0,19	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,10	0,14	0,19	0,19	0,20	0,13	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,00	0,15	1,29	2,20	3,17	3,93	4,55	4,87	5,00	4,94	4,90	4,57	3,80	2,89	1,93	0,96	0,20	0,00

Tabela 5.2.7. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1971–1980
Table 5.2.7. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1971–1980

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,16	0,23	0,25	0,27	0,27	0,25	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,16	0,23	0,29	0,32	0,33	0,32	0,29	0,23	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,00	0,01	0,17	0,34	0,41	0,45	0,46	0,46	0,45	0,43	0,35	0,19	0,02	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,00	0,05	0,23	0,40	0,47	0,51	0,50	0,48	0,43	0,43	0,41	0,39	0,35	0,25	0,09	0,00	0,00
V	0,00	0,06	0,33	0,46	0,55	0,60	0,57	0,55	0,56	0,54	0,54	0,52	0,51	0,47	0,42	0,32	0,09	0,00
VI	0,00	0,15	0,40	0,51	0,55	0,57	0,54	0,54	0,51	0,51	0,48	0,47	0,49	0,50	0,49	0,43	0,24	0,01
VII	0,00	0,09	0,31	0,42	0,47	0,51	0,53	0,52	0,51	0,50	0,48	0,50	0,48	0,46	0,43	0,36	0,18	0,02
VIII	0,00	0,00	0,17	0,41	0,49	0,56	0,58	0,60	0,60	0,59	0,56	0,54	0,51	0,50	0,47	0,30	0,03	0,00
IX	0,00	0,00	0,00	0,06	0,28	0,41	0,49	0,50	0,52	0,50	0,49	0,48	0,46	0,37	0,10	0,01	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,23	0,31	0,35	0,36	0,38	0,39	0,38	0,35	0,17	0,01	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,17	0,20	0,24	0,24	0,23	0,19	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	0,18	0,20	0,21	0,22	0,18	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,00	0,30	1,26	2,11	3,06	4,02	4,63	4,92	5,01	4,96	4,85	4,63	4,00	3,10	2,18	1,51	0,55	0,03

Tabela 5.2.8. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1981–1990
Table 5.2.8. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1981–1990

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,15	0,22	0,25	0,22	0,24	0,19	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,14	0,24	0,29	0,33	0,35	0,34	0,34	0,26	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,00	0,01	0,14	0,29	0,37	0,40	0,43	0,45	0,44	0,44	0,37	0,21	0,02	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,00	0,03	0,16	0,37	0,45	0,49	0,51	0,51	0,50	0,48	0,47	0,44	0,39	0,25	0,05	0,00	0,00
V	0,00	0,03	0,30	0,49	0,58	0,63	0,64	0,65	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,53	0,49	0,34	0,09	0,00
VI	0,00	0,09	0,34	0,45	0,49	0,50	0,50	0,49	0,47	0,45	0,45	0,47	0,47	0,44	0,42	0,34	0,15	0,00
VII	0,00	0,07	0,36	0,51	0,56	0,60	0,60	0,59	0,58	0,58	0,56	0,55	0,54	0,53	0,49	0,40	0,17	0,01
VIII	0,00	0,01	0,14	0,43	0,53	0,60	0,64	0,65	0,65	0,62	0,62	0,61	0,59	0,55	0,46	0,23	0,01	0,00
IX	0,00	0,00	0,00	0,04	0,21	0,40	0,46	0,51	0,52	0,50	0,49	0,45	0,41	0,29	0,09	0,00	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,32	0,44	0,48	0,51	0,50	0,50	0,49	0,43	0,19	0,01	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,15	0,22	0,25	0,27	0,28	0,24	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,14	0,17	0,19	0,18	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,00	0,20	1,17	2,09	3,00	4,06	4,76	5,13	5,28	5,24	5,16	4,95	4,31	3,24	2,23	1,36	0,43	0,01

Tabela 5.2.9. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1991–2000
Table 5.2.9. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1991–2000

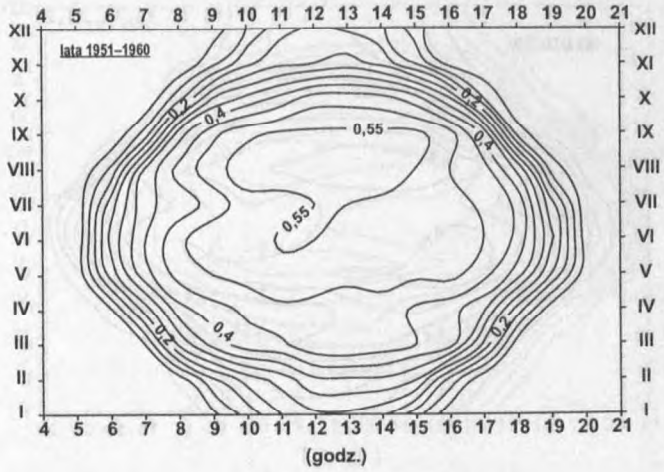
Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,09	0,18	0,26	0,29	0,30	0,29	0,26	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	0,19	0,25	0,28	0,28	0,30	0,28	0,23	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00
III	0,00	0,00	0,00	0,02	0,17	0,32	0,39	0,42	0,42	0,44	0,43	0,42	0,39	0,30	0,09	0,00	0,00	0,00
IV	0,00	0,00	0,07	0,24	0,37	0,47	0,50	0,51	0,50	0,48	0,45	0,42	0,41	0,37	0,30	0,13	0,01	0,00
V	0,00	0,04	0,26	0,46	0,54	0,58	0,63	0,63	0,63	0,62	0,60	0,56	0,52	0,50	0,50	0,43	0,21	0,02
VI	0,01	0,09	0,31	0,49	0,54	0,55	0,57	0,56	0,55	0,53	0,50	0,51	0,49	0,45	0,46	0,40	0,28	0,04
VII	0,00	0,06	0,33	0,48	0,54	0,58	0,59	0,59	0,58	0,56	0,56	0,56	0,54	0,53	0,54	0,50	0,29	0,06
VIII	0,00	0,00	0,10	0,36	0,52	0,61	0,65	0,65	0,63	0,63	0,62	0,61	0,57	0,54	0,49	0,34	0,11	0,01
IX	0,00	0,00	0,00	0,03	0,24	0,40	0,46	0,49	0,51	0,50	0,48	0,45	0,41	0,34	0,15	0,06	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,24	0,34	0,40	0,42	0,43	0,42	0,38	0,31	0,17	0,04	0,00	0,00	0,00
XI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,15	0,21	0,23	0,24	0,25	0,20	0,15	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00
XII	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	0,17	0,21	0,22	0,24	0,19	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Suma	0,01	0,22	1,10	2,12	3,10	4,02	4,75	5,15	5,25	5,23	5,13	4,85	4,22	3,42	2,59	1,87	0,91	0,13

Tabela 5.2.10a. Trendy godzinnych wartości usłonecznienia (godz. 3.00–12.00) w Łodzi w latach 1951–2000
Table 5.2.10a. The linear trends of hourly values of sunshine duration (3.00 a.m.–12.00 p.m.) in Łódź in the period 1951–2000

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12
I	0,000000	0,000629	0,000629	0,000629	0,000982	0,000689	0,000846	0,000626	0,000534
II	0,000000	0,000057	0,000200	–0,000421	0,000237	0,000573	–0,000318	–0,000052	0,000010
III	0,000000	0,000007	0,000007	–0,000639	–0,002043	–0,001047	–0,000726	–0,000501	–0,001330
IV	0,000000	0,000095	0,000521	–0,000607	–0,000641	0,000532	0,000534	0,000258	0,000310
V	0,000000	0,000776	0,001711	0,003285	0,003199	0,003607	0,003827	0,003845	0,003915
VI	0,000102	0,001939	0,000170	0,001042	0,000146	–0,000656	0,000252	–0,001104	–0,001071
VII	0,000001	0,001175	0,001836	0,002006	0,002031	0,002160	0,001275	0,000884	0,000334
VIII	0,000000	–0,000019	–0,000824	–0,000355	0,000823	0,001727	0,001993	0,002333	0,001742
IX	0,000000	0,000000	–0,000047	–0,002552	–0,004291	–0,002553	–0,002467	–0,002127	–0,001538
X	0,000000	0,000000	0,000000	0,000133	–0,001339	–0,000837	0,000215	0,000313	–0,000141
XI	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	–0,000101	–0,000799	–0,000927	–0,000367	–0,000004
XII	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000105	0,000140	–0,000131	–0,000422	–0,000400

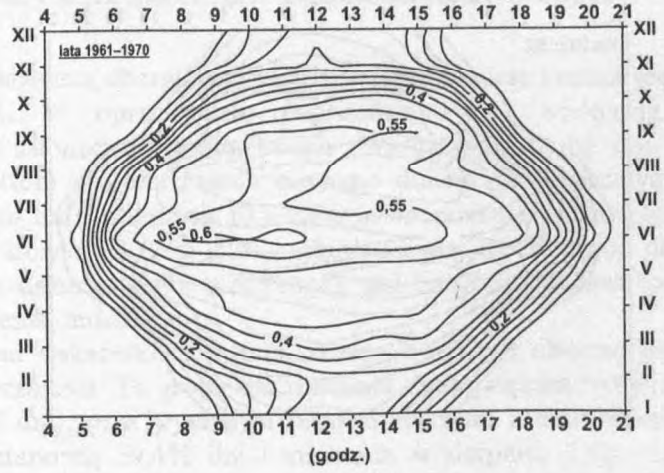
Tabela 5.2.10b. Trendy godzinnych wartości usłonecznienia (godz. 12.00–21.00) w Łodzi w latach 1951–2000
Table 5.2.10b. The linear trends of hourly values of sunshine duration (12.00 p.m.–21.00 p.m.) in Łódź in the period 1951–2000

Godz. / M-ce	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0,000381	0,001122	0,003061	0,002774	0,000275	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
II	0,000871	0,003287	0,003029	0,000268	0,000022	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
III	–0,000868	–0,000571	–0,000367	–0,000408	0,001667	0,001472	0,000007	0,000000	0,000000
IV	0,000085	–0,000888	–0,000694	–0,000126	0,000411	0,002885	0,002532	0,000122	0,000000
V	0,003976	0,003349	0,002580	0,001563	0,002191	0,004176	0,006740	0,005004	0,000350
VI	–0,001602	–0,001366	–0,001298	–0,001552	–0,001824	–0,000587	0,002575	0,005677	0,000871
VII	0,000342	0,000300	0,000042	0,000087	0,000485	0,001852	0,006276	0,006203	0,001072
VIII	0,001267	0,001561	0,002003	0,002377	0,002495	0,004211	0,006727	0,002292	0,000252
IX	–0,001924	–0,002406	–0,003240	–0,002857	–0,001069	0,001907	0,001119	0,000027	0,000000
X	–0,000124	–0,000475	–0,000073	0,001221	0,002328	0,000881	0,000000	0,000000	0,000000
XI	0,000243	0,001216	0,001952	0,003546	0,001325	0,000129	0,000000	0,000000	0,000000
XII	0,000384	0,001233	0,002431	0,001588	0,000228	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000



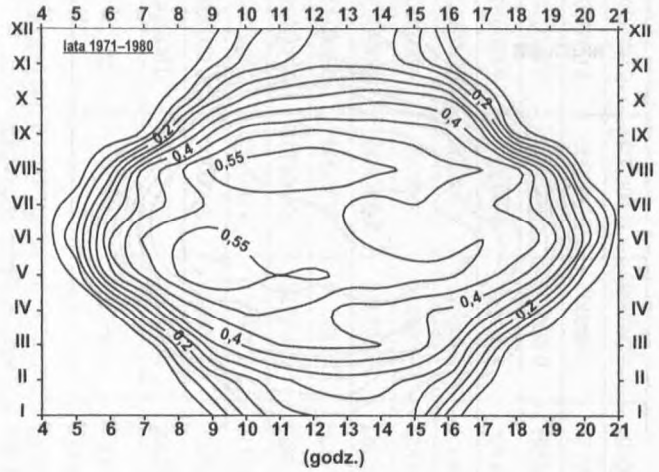
Ryc. 5.2.7. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1951–1960

Fig. 5.2.7. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1951–1960



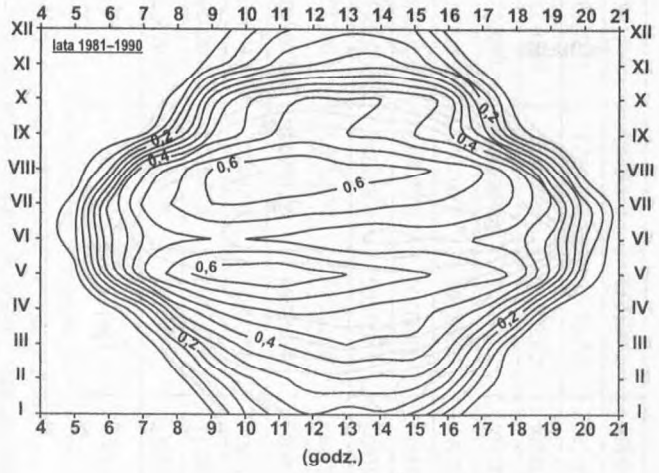
Ryc. 5.2.8. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1961–1970

Fig. 5.2.8. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1961–1970



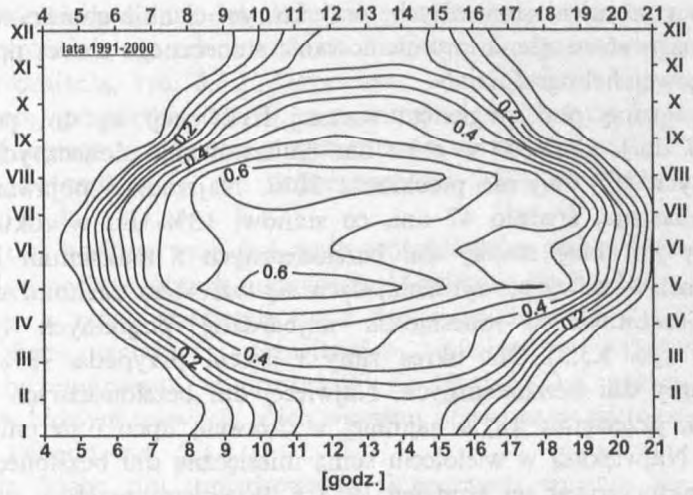
Ryc. 5.2.9. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1971–1980

Fig. 5.2.9. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1971–1980



Ryc. 5.2.10. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1981–1990

Fig. 5.2.10. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1981–1990



Ryc. 5.2.11. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1991–2000

Fig. 5.2.11. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1991–2000

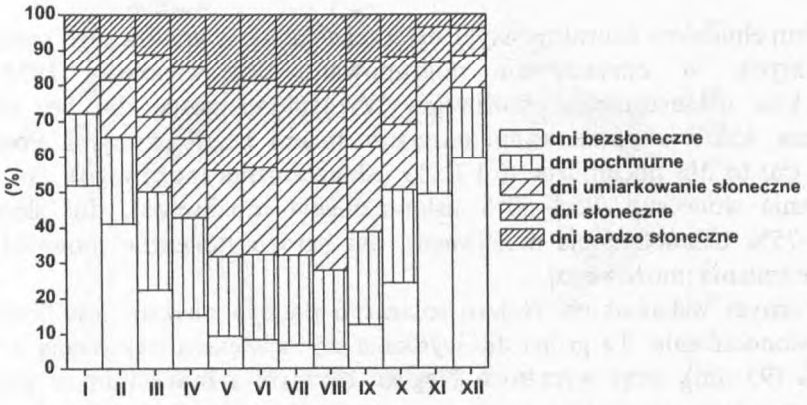
5.3. GŁÓWNE CECHY STRUKTURY USŁONECZNIENIA W ŁODZI

Uzupełnieniem charakterystyki usłonecznienia jest analiza jego cech strukturalnych. W opracowaniu pogrupowano dni wielolecia 1951–2000 w 5 klas usłonecznienia możliwego. Wyróżniono grupę dni bez usłonecznienia, które w opracowaniu nazwano dniami bezsłonecznymi. Pozostałe klasy dni to dni pochmurne (0,1–25% usłonecznienia możliwego), dni umiarkowanie słoneczne (25,1–50% usłonecznienia możliwego), dni słoneczne (50,1–75% usłonecznienia możliwego), dni bardzo słoneczne (powyżej 75% usłonecznienia możliwego).

Ważnym wskaźnikiem reżimu solarnego danego obszaru jest liczba dni bez usłonecznienia. Ta grupa dni wyróżnia się największą frekwencją w roku, 25,4% (93 dni), oraz wyraźnym biegiem rocznym z maksimum w grudniu, kiedy to stanowią 59,4% dni i minimum w sierpniu, 5,4% dni. Przewaga dni bezsłonecznych zaznacza się we wszystkich miesiącach z wyjątkiem maja, czerwca, lipca i sierpnia. Duża ich frekwencja w okresie od listopada do lutego (średnio ponad 40%) jest wyrazem charakterystycznych cech klimatu Polski – dużego zachmurzenia miesięcy zimowych. Wpływ na rejestrację usłonecznienia w tych miesiącach ma również czynnik astronomiczny – niski

kąt padania promieni słonecznych, przy którym cienkie chmury warstwowe mogą redukować natężenie promieniowania słonecznego nawet poniżej wartości progowej heliografu.

Drugą grupą pod względem rocznej frekwencji są dni pochmurne, 24,2% (87 dni). Częstość w roku dni umiarkowanie słonecznych (71 dni) i słonecznych (67 dni) nie przekracza 20%. Najrzadziej pojawiają się dni bardzo słoneczne, średnio 47 dni, co stanowi 13% dni w roku. Charakterystyczny jest bieg roczny dni bezsłonecznych z maksimum liczebności w miesiącach zimowych, wyróżniających się wzrostem zachmurzenia, i minimum liczebności w miesiącach najbardziej pogodnych (ryc. 5.3.1, ryc. 5.3.2, ryc. 5.3.3). Na okres zimy i jesieni przypada 78% (72 dni) rocznej sumy dni bezsłonecznych. Najwięcej dni bezsłonecznych notuje się w grudniu, przeciętnie 18, a najmniej w czerwcu, lipcu i sierpniu, średnio po 2 dni. Największą w wieloleciu sumą miesięczną dni bezsłonecznych (25 dni), charakteryzował się grudzień 1959 r. Wieloletni przebieg sum miesięcznych dni bez słońca przedstawia rysunek 5.3.8. Dni bezsłoneczne mogą nie wystąpić w okresie od kwietnia do września. Najczęściej ich brak notuje się w sierpniu (13 razy w okresie 1951–2000), tab. XV (załącznik). W wieloleciu brakiem dni bezsłonecznych 10 razy charakteryzował się lipiec, 6 razy czerwiec, 5 razy maj, 2 razy kwiecień, a 1 raz dni bez słońca nie wystąpiły we wrześniu.



Ryc. 5.3.1. Struktura usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.1. The structure of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Pozostałe klasy dni, tj. dni pochmurne, umiarkowanie słoneczne i słoneczne, nie wyróżniają się tak wyraźnym biegiem rocznym jak opisane tu dni bez usłonecznienia, ryc. 5.3.1. Największy udział dni pochmurnych notuje się w marcu, przeciętnie 27,7%, a najmniejszy w grudniu, średnio 19,7%. Udział dni umiarkowanie słonecznych zmienia się w roku od 9,1% w grudniu do 24,6% w czerwcu, a dni słonecznych od 7,9% w grudniu do 25,8% w sierpniu (tab. 5.3.1, ryc. 5.3.1).

Klasa dni pochmurnych jest mało zróżnicowana pod względem średniej liczby dni w poszczególnych miesiącach. Miesięczna liczba dni pochmurnych zmienia się w roku przeciętnie od 6 dni w grudniu do 8 dni w marcu, kwietniu, lipcu, wrześniu i październiku. Najwięcej w wieloleciu dni pochmurnych zanotowano w lipcu 1980 r., 19 dni. Dni pochmurne mogą wystąpić w każdym miesiącu, a ich wyraźna przewaga w wieloleciu przypada na I i II dekadę, ryc. 5.3.4.

Średnia liczba dni umiarkowanie słonecznych zmienia się od 3 dni w grudniu do 8 dni w lipcu. Pierwsza dekada wielolecia wyróżniała się większą frekwencją tej grupy dni w ciągu całego roku w stosunku do okresu późniejszego. Najwięcej dni umiarkowanie słonecznych wystąpiło w czerwcu 1987 i 1991 r., 15 dni, ryc. 5.3.5.

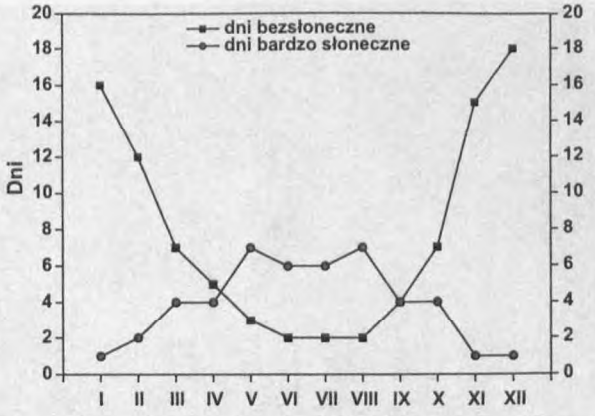
Średnia liczba dni słonecznych zmienia się od 3 dni (luty, listopad, grudzień) do 8 dni (czerwiec, sierpień). Najwięcej dni słonecznych wystąpiło w sierpniu 1951 r., 16 dni. Brak dni słonecznych zanotowano w styczniu (4 razy), lutym (5 razy), czerwcu (1 rok), październiku (1 rok), listopadzie (3 razy) i grudniu (6 razy), ryc. 5.3.6.

Najmniej liczną grupą dni w roku są dni bardzo słoneczne. Klasa dni bardzo słonecznych wyróżnia się charakterystycznym przebiegiem rocznym odwrotnym do przebiegu dni bezsłonecznych (ryc. 5.3.1, ryc. 5.3.2, ryc. 5.3.7) – najwięcej dni bardzo słonecznych pojawia się w najbardziej pogodnych miesiącach z maksimum udziału w maju i sierpniu (21%), a najmniej tych dni notuje się jesienią i zimą (9,9% i 4,4%), z minimalnym ich udziałem w listopadzie, 3,6%. Na okres wiosny i lata przypada 72% (34 dni) rocznej liczby dni bardzo słonecznych. Przeciętnie liczba dni bardzo słonecznych w poszczególnych miesiącach zmienia się od 1 (styczeń, listopad, grudzień) do 7 (maj, sierpień), ryc. 5.3.2. Najwięcej bardzo słonecznych dni wystąpiło w lipcu 1994 r., 21 dni, ryc. 5.3.7. Czerwiec i sierpień są jedynymi miesiącami, w których nie odnotowano w analizowanym 50-leciu braku dni bardzo słonecznych. Z dużym prawdopodobieństwem dni bardzo słoneczne mogą nie pojawić się w listopadzie (26 razy w 50-leciu), grudniu (21 razy) i styczniu (21 razy). Brak dni bardzo słonecznych zanotowano w ciągu 18 lat w lutym, 11 lat w marcu i w ciągu 2 lat w kwietniu i maju, tab. XIII (załącznik).

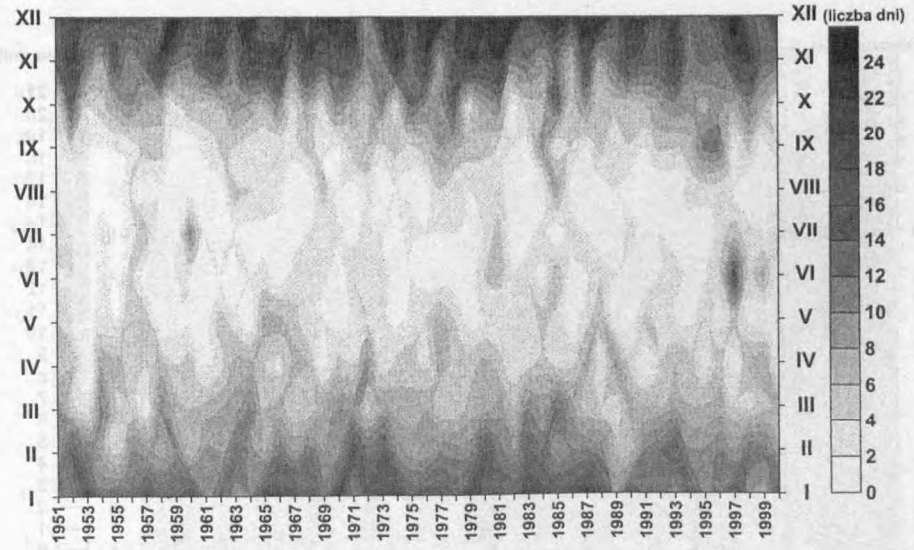
Tabela 5.3.1. Rozkład dni (w % danego miesiąca, sezonu, roku) w pięciu klasach usłonecznienia możliwego w Łodzi w latach 1951–2000

Table 5.3.1. The days distribution (in % of a month, a season, a year) in five classes of possible sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

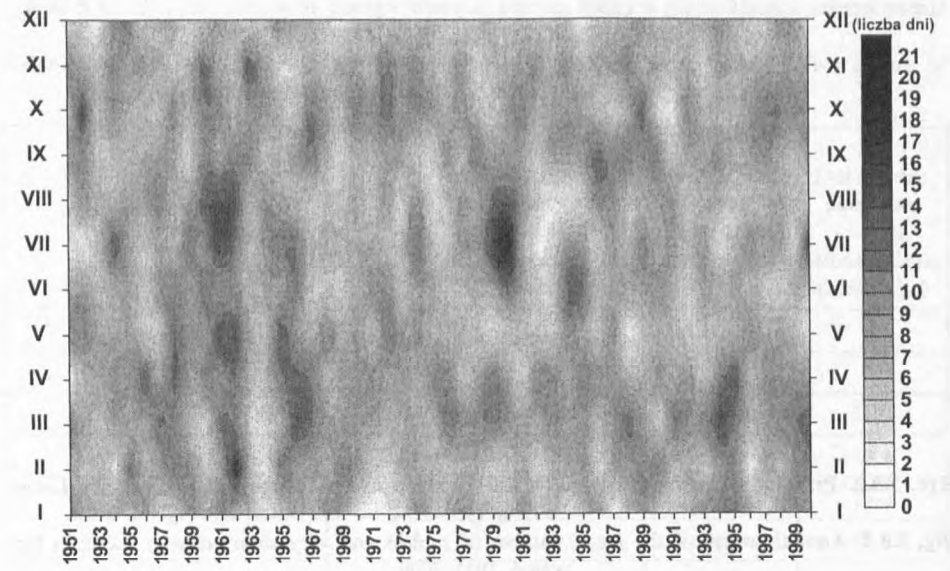
Okres	Dni bezsłoneczne	Dni pochmurne (0,1–25% usłonecznienia możliwego)	Dni umiarkowanie słoneczne (25,1–50% usłonecznienia możliwego)	Dni słoneczne (50,1–75% usłonecznienia możliwego)	Dni bardzo słoneczne (>75% usłonecznienia możliwego)
I	51,8	20,3	12,2	11,0	4,7
II	41,1	24,5	15,8	12,7	5,9
III	22,3	27,7	21,2	17,0	11,3
IV	15,2	27,6	22,0	19,8	14,9
V	9,4	22,3	24,3	23,0	21,0
VI	8,3	23,9	24,6	24,3	18,9
VII	6,7	25,3	23,7	23,7	20,6
VIII	5,4	22,4	24,5	25,8	21,9
IX	12,5	26,2	24,1	23,6	13,6
X	24,2	26,3	18,5	19,0	12,0
XI	49,3	24,7	12,1	10,3	3,6
XII	59,4	19,7	9,1	7,9	3,9
Wiosna (III–V)	15,6	25,3	22,8	19,8	16,5
Lato (VI–VIII)	6,8	23,6	23,2	25,3	21,1
Jesień (IX–XI)	28,6	25,2	18,7	17,6	9,9
Zima (XII–I)	51,0	21,1	12,3	11,2	4,4
Rok	25,4	24,2	19,4	18,3	12,7



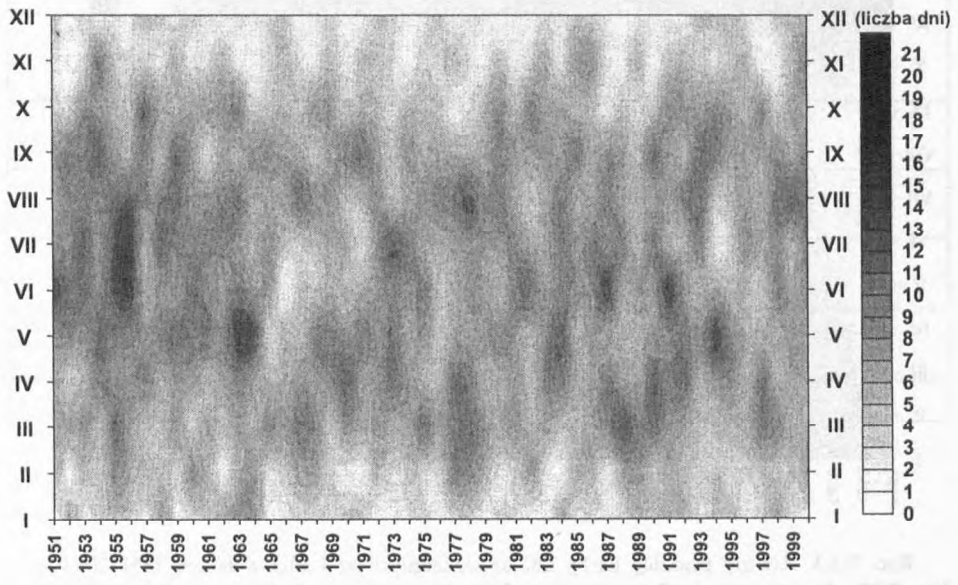
Ryc. 5.3.2. Przebieg roczny średniej liczby dni bezsłonecznych i bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.2. Annual course of the mean number of sunless and very sunny days in Łódź in the period 1951–2000



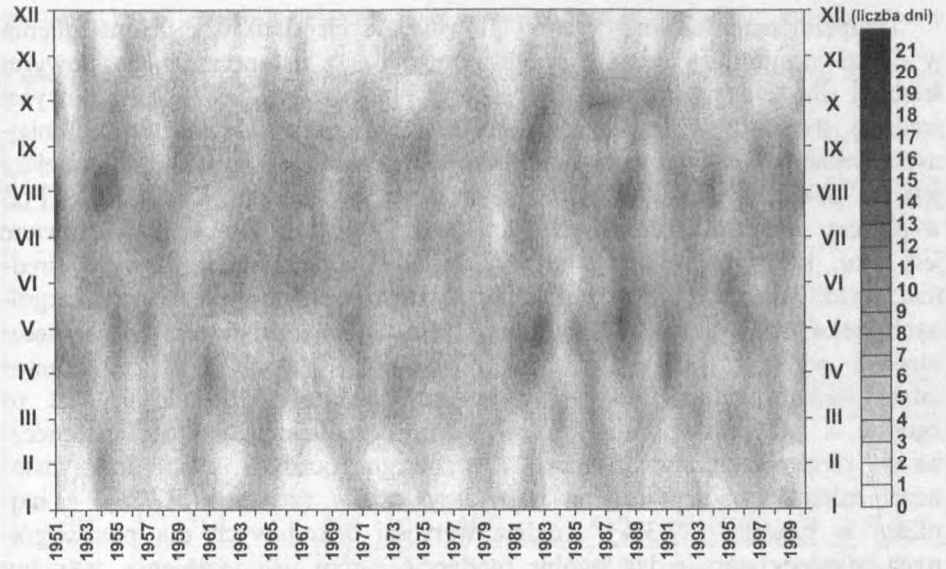
Ryc. 5.3.3. Roczny przebieg liczby dni bezsłonecznych w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.3. Annual course of the number of sunless days in Łódź in the period 1951–2000



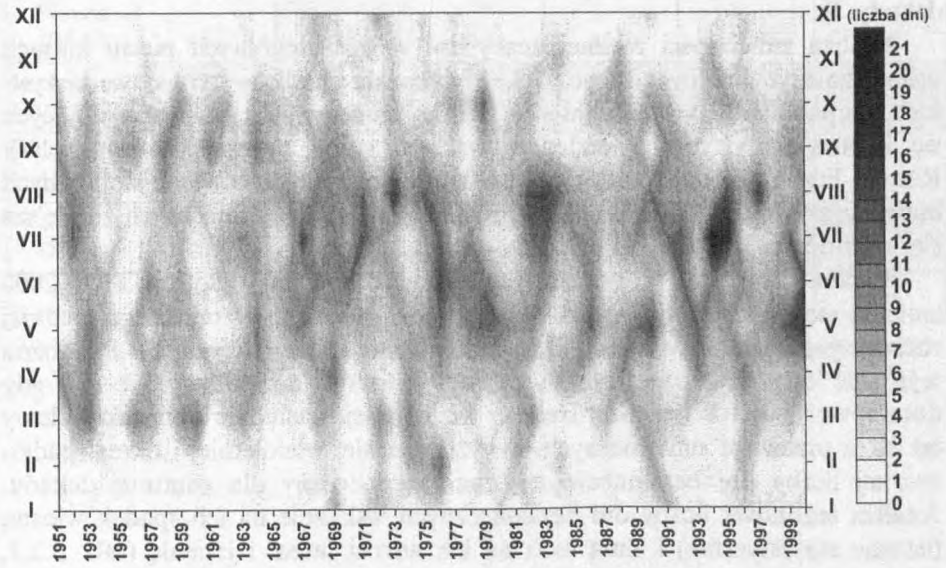
Ryc. 5.3.4. Roczny przebieg liczby dni pochmurnych w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.4. Annual course of the number of cloudy days in Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.3.5. Roczny przebieg liczby dni umiarkowanie słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.5. Annual course of the number of moderately sunny days in Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.3.6. Roczny przebieg liczby dni słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.6. Annual course of the number of sunny days in Łódź in the period 1951–2000



Ryc. 5.3.7. Roczny przebieg liczby dni bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000
Fig. 5.3.7. Annual course of the number of very sunny days in Łódź in the period 1951–2000

Uzupełnieniem charakterystyki głównych cech struktury usłonecznienia w Łodzi jest analiza udziału procentowego dni z usłonecznieniem powyżej średniej dla danego miesiąca, pory roku i roku (tab. 5.3.2). Dni powyżej średniej stanowią w latach 1951–2000 42,5% roku. Udział ten w kolejnych dekadach analizowanego wielolecia nie różni się istotnie, najmniejszy jest w dekadzie II (39,9%), a najwyższy w dekadzie V (44,1%). Pod względem wartości sezonowych dla 50-lecia najbardziej uprzywilejowane jest lato, kiedy to 49,5% stanowią dni z usłonecznieniem powyżej średniej, oraz wiosna (46,3%). Analiza wartości sezonowych w poszczególnych dekadach wykazała, iż wiosną, latem i zimą udział dni z usłonecznieniem wyższym od średniej jest największy w latach 1991–2000, natomiast jesienią udział ten jest najwyższy w latach 1961–1970. Jest to zgodne z prawidłowościami, jakie ukazała analiza zmienności usłonecznienia rzeczywistego w 50-leciu. W przebiegu rocznym udział dni z usłonecznieniem ponad przeciętną najwyższy jest w czerwcu (51,7%), a najniższy w grudniu (27,3%). Analiza wartości dekadowych dla poszczególnych miesięcy potwierdza ogólne tendencje zmian usłonecznienia, wyraźny wzrost usłonecznienia w miesiącach od maja do sierpnia oraz spadek usłonecznienia we wrześniu i jego wzrost w miesiącach zimowych, tab. 5.3.2. Największy wzrost udziału dni z usłonecznieniem powyżej średniej zanotowano w V dekadzie w maju, o 21% w stosunku do dekady II.

Analiza zmienności rocznej liczby dni w poszczególnych pięciu klasach usłonecznienia możliwego (ryc. 5.3.8.) wykazała spadkowy trend we wszystkich grupach dni z wyjątkiem dni bardzo słonecznych, charakteryzujących się istotną statystycznie tendencją wzrostu sumy rocznej (4 dni/10 lat). Roczna liczba dni bezsłonecznych, pochmurnych i umiarkowanie słonecznych maleje przeciętnie 1 dzień na 10 lat, a suma roczna dni słonecznych zmniejsza się z tendencją 1 dzień na 100 lat (tab. 5.3.3).

Roczna liczba dni bezsłonecznych w analizowanym wieloleciu 1951–2000 zmienia się od 65 (1989 r.) do 113 (1952 r., 1981 r.). W przebiegu średniej ruchomej pentadowej rocznej liczby dni bezsłonecznych (ryc. 5.3.8) można wyróżnić trzy charakterystyczne okresy: pierwszy do połowy lat 60., gdy dominowały wartości poniżej średniej wieloletniej, następnie okres do połowy lat 80. z przewagą sum rocznych powyżej średniej wieloletniej i okres spadku rocznej liczby dni bezsłonecznych, charakterystyczny dla ostatniej dekady. Analiza sezonowa liczby dni bezsłonecznych wskazuje na ich spadek wiosną (istotny statystycznie) i zimą oraz na ich wzrost latem i jesienią (tab. 5.3.3, 5.3.4). Analiza tendencji sum miesięcznych dni bezsłonecznych wykazała ich spadek we wszystkich miesiącach roku z wyjątkiem czerwca i września (wzrost istotny statystycznie) oraz października, z niewielkim wskaźnikiem kierunkowym trendu (tab. 5.3.3).

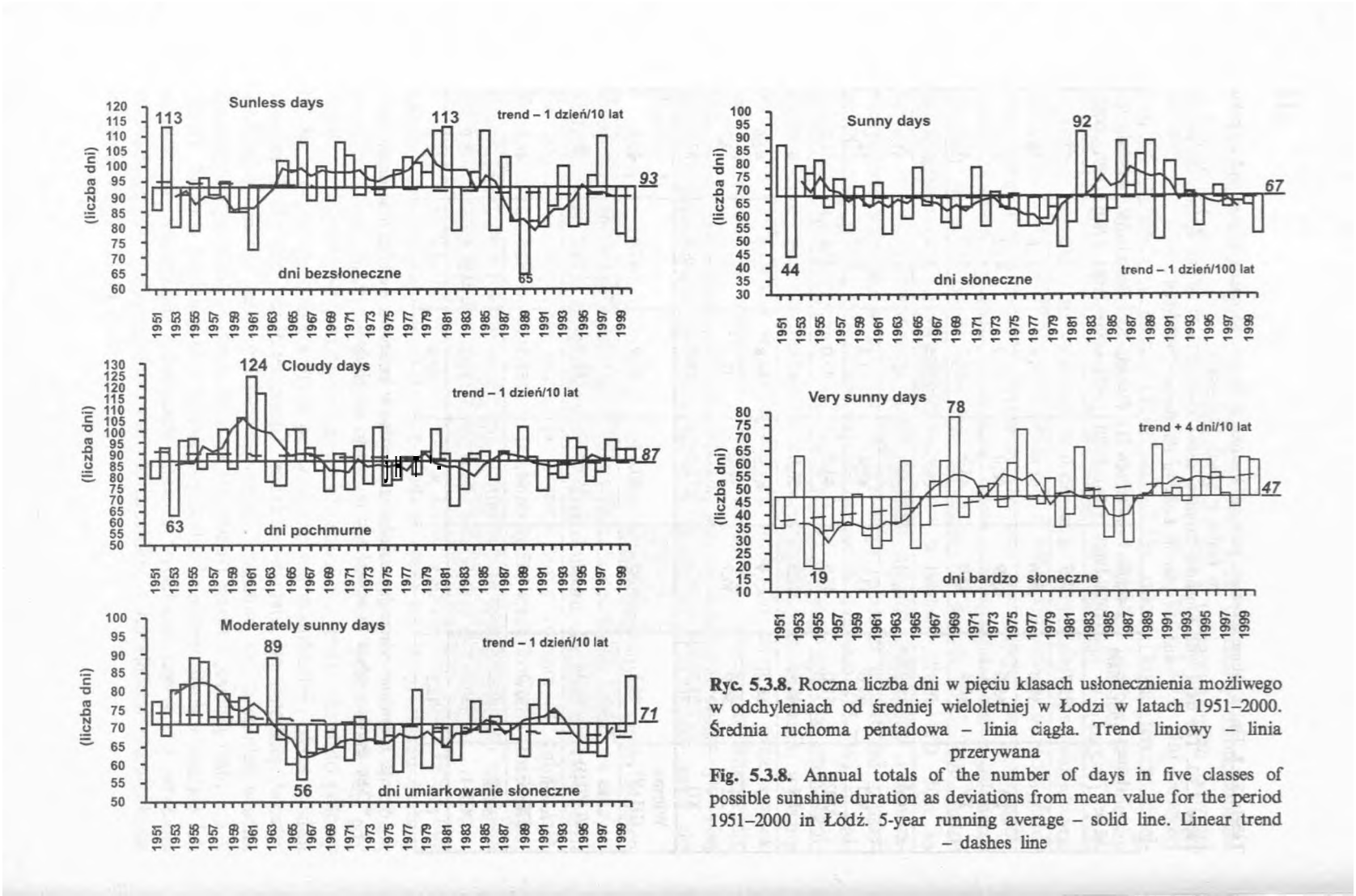
Tabela 5.3.2. Dni z usłonecznieniem powyżej średniej w % danego miesiąca, pory roku i roku w Łodzi w latach 1951–2000

Table 5.3.2. The days with sunshine duration above average in % of the month, the season and the year in Łódź in the period 1951–2000

Lata / M-ce	1951–2000	Dekada I (1951–1960)	Dekada II (1961–1970)	Dekada III (1971–1980)	Dekada IV (1981–1990)	Dekada V (1991–2000)
I	31,7	27,7	31,0	32,2	29,3	37,7
II	37,0	38,6	31,8	36,4	37,8	36,8
III	45,0	43,9	40,0	43,9	45,2	43,2
IV	46,4	45,0	46,3	44,7	45,3	47,3
V	50,0	46,1	36,4	54,5	57,4	57,4
VI	51,7	46,7	58,0	51,7	42,3	51,3
VII	49,0	43,2	48,4	44,2	52,2	54,2
VIII	51,0	45,8	44,5	49,0	58,1	55,8
IX	48,4	52,3	53,0	47,0	43,0	46,0
X	44,2	43,9	43,5	36,8	53,9	42,6
XI	30,9	30,7	25,3	31,3	33,0	32,3
XII	27,3	26,1	25,2	29,0	24,2	32,2
Wiosna (III–V)	46,3	47,8	40,6	45,9	47,8	49,1
Lato (VI–VIII)	49,5	44,3	50,0	48,3	51,7	53,8
Jesień (IX–XI)	41,2	44,5	41,2	38,2	43,3	41,1
Zima (XII–I)	30,8	30,1	29,8	32,2	30,4	35,1
Rok	42,5	42,3	39,9	40,9	43,4	44,1

* Pola zacienione oznaczają wartości ekstremalne w przebiegu rocznym i sezonach.

* The extreme values in annual and in seasons are shaded.



Ryc. 5.3.8. Roczna liczba dni w pięciu klasach usłonecznienia możliwego w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana

Fig. 5.3.8. Annual totals of the number of days in five classes of possible sunshine duration as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź. 5-year running average – solid line. Linear trend – dashes line

Tabela 5.3.3. Trendy liniowe sum miesięcznych, sezonowych i rocznych dni w pięciu klasach usłonecznienia możliwego

Table 5.3.3. The linear trends of the monthly, the seasonal and the annual totals of the days in five classes of possible sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Okres	Dni bezsłoneczne	Dni pochmurne (0,1–25% usłonecznienia możliwego)	Dni umiarkowanie słoneczne (25,1–50% usłonecznienia możliwego)	Dni słoneczne (50,1–75% usłonecznienia możliwego)	Dni bardzo słoneczne (>75% usłonecznienia możliwego)
I	–0,05	0,008	–0,005	0,007	0,04**
II	–0,01	–0,01	–0,01	0,02	0,02
III	–0,03	0,05	0,006	0,02	–0,05
IV	–0,02	0,008	0,01	–0,009	0,01
V	–0,02	–0,08**	–0,05	0,03	0,1**
VI	0,05*	–0,02	–0,04	–0,02	0,035
VII	–0,01	0,0003	–0,04	–0,02	0,08
VIII	–0,003	–0,06	–0,02	–0,005	0,09*
IX	0,05*	0,03	–0,003	–0,02	–0,06*
X	0,007	–0,01	–0,004	–0,003	0,01
XI	–0,03	–0,01	0,02	–0,004	0,02
XII	–0,02	0,005	–0,003	–0,0002	0,02
Wiosna (III–V)	–0,08*	–0,03	–0,03	0,04	0,09
Lata (VI–VIII)	0,04	–0,08	–0,1	–0,05	0,2*
Jesień (IX–XI)	0,04	0,006	0,01	–0,02	–0,3
Zima (XII–II)	–0,09	0,0006	–0,02	0,02	0,09*
Rok	–0,1	–0,1	–0,14	–0,01	0,4**

* Istotny statystycznie na poziomie 5%.
* Statistical significance on 5% level.
** Istotny statystycznie na poziomie 1%.
** Statistical significance on 1% level.

Dni pochmurne, podobnie jak dni bezsłoneczne, cechuje tendencja spadkowa przeciętnie 1 dzień na 10 lat. Ta klasa dni była najbardziej liczna w 1961 r., kiedy to zanotowano 124 dni pochmurne, a najmniej liczna w 1952 r., gdy wystąpiły 63 dni pochmurne. Sezonowe liczby dni pochmurnych cechuje spadkowa tendencja wiosną i latem, i niewielka, prawie liniowa dodatnia tendencja jesienią i zimą (tab. 5.3.3). Liczba dni pochmurnych w lutym, maju (istotny statystycznie), czerwcu, sierpniu, październiku i listopadzie charakteryzuje się trendem ujemnym. W pozostałych miesiącach liczba dni pochmurnych nieznacznie wzrasta (tab. 5.3.3).

Liczba dni umiarkowanie słonecznych w roku zmieniała się od 56 (1966 r.) do 89 (1955 r.) i, podobnie jak w przypadku dwóch wyżej opisanych klas dni, charakteryzuje się tendencją spadkową przeciętnie 1 dzień na 10 lat. Trendy sezonowej liczby dni umiarkowanie słonecznych są ujemne we wszystkich porach roku z wyjątkiem jesieni (tab. 5.3.4).

Roczna liczba dni słonecznych zmieniała się w analizowanym 50-leciu od 44 (1952 r.) do 92 (1982 r.). Spadkowy trend sum rocznych jest niewielki, przeciętnie 1 dzień na 100 lat. Wiosna i zima cechuje się dodatnią tendencją liczby dni słonecznych, a lato i jesień – tendencją ujemną (tab. 5.3.3).

Dni bardzo słoneczne wyróżniają się na tle opisanych tutaj klas dni dodatnią tendencją liczby rocznej, przeciętny wzrost (istotny statystycznie) o 4 dni na 10 lat. Roczna liczba tej klasy dni wahała się w analizowanym 50-leciu od 19 (1955 r.) do 78 dni (1969 r.), ryc. 5.3.8. Do 1967 r. liczba dni bardzo słonecznych była niższa od średniej wieloletniej, w pozostałych dekadach, a szczególnie w ostatnim 10-leciu, dominują wartości przewyższające średnią wieloletnią. Sezonowe sumy dni bardzo słonecznych wzrastają we wszystkich porach roku z wyjątkiem jesieni (tab. 5.3.4). Trendy miesięcznej liczby dni bardzo słonecznych w latach 1951–2000 są dodatnie we wszystkich miesiącach z wyjątkiem marca i września, tab. 5.3.3.

Tabela 5.3.4. Wartość statystyki progresywnej testu Mann-Kendalla dla dni bezsłonecznych i bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000

Table 5.3.4. The values of the progressive (forward) statistic of Mann-Kendall test for sunless and very sunny days in Łódź in the period 1951–2000

Sezon	Dni bezsłoneczne	Dni bardzo słoneczne
Wiosna (III–V)	–3,49*	1,44
Lato (VI–VIII)	–0,68	2,18*
Jesień (IX–XI)	0,36	–1,13
Zima (XII–II)	–1,58	2,07*
Rok	–0,81	2,63*

* Istotny statystycznie na poziomie 5%.

* Statistical significance on 5% level.

W analizowanym wieloleciu liczba miesięczna dni umiarkowanie słonecznych maleje z wyjątkiem marca, kwietnia i listopada (tab. 5.3.3).

Spośród pięciu opisywanych klas dni, największy wpływ na kształtowanie reżimu solarnego danego obszaru wywierają dwie skrajne klasy usłonecznienia możliwego – dni bezsłoneczne i bardzo słoneczne. Dla tych klas analizę zmienności w wieloleciu uzupełniono o wyniki testu Mann-Kendalla dla sum rocznych i sezonowych (tab. 3.3.4) oraz przedstawiono graficzny obraz przebiegu zmienności wartości statystyk sekwencyjnych testu (ryc. 5.3.9, 5.3.10).

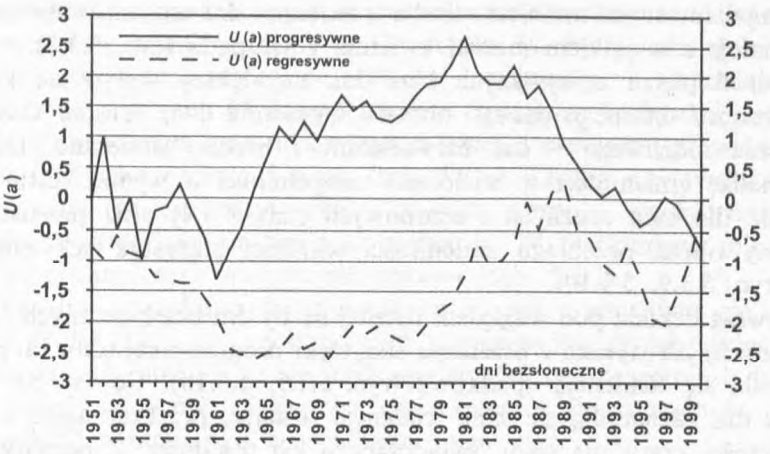
Pierwsza dekada pod względem rocznej liczby dni bezsłonecznych i bardzo słonecznych, jak wynika z przebiegu statystyki progresywnej testu rangowego, cechowała się tendencją spadkową (ryc. 5.3.9, 5.3.10). Od lat 60. w obu klasach dni zaznaczają się silne tendencje rosnące, przekraczające w latach 70. wartości krytyczne testu, świadczące o ich trwałości. Z początkiem lat 80. nastąpiło zahamowanie wzrostu rocznej liczby dni bez słońca, a zmniejszanie rocznej liczby tej klasy dni utrzymuje się do końca analizowanego 50-lecia (ryc. 5.3.9). Klasa dni bardzo słonecznych cechowała się w drugiej pentadzie lat 80. niewielkim spadkiem ich liczby. Z początkiem ostatniej dekady występuje trwały wzrost liczby dni bardzo słonecznych w roku (ryc. 5.3.10).

Dni bezsłoneczne i bardzo słoneczne charakteryzują się przeciwnymi tendencjami miesięcznej i sezonowej ich liczby w wieloleciu. Liczba dni bez słońca maleje we wszystkich miesiącach z wyjątkiem czerwca, września i października, a liczba dni bardzo słonecznych – przeciwnie – maleje tylko w marcu i we wrześniu (tab. 3.3.3, 3.3.4).

W aspekcie bioklimatycznym ważnym wskaźnikiem reżimu solarnego są zwarte okresy dni bezsłonecznych. Brak dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego przez kolejnych 5 dni stanowi kryterium niedoboru bodźców świetlnych stymulujących równowagę i aktywność ustroju człowieka (za: Dubicka, Limanówka 1994, Dubicka i in. 1995).

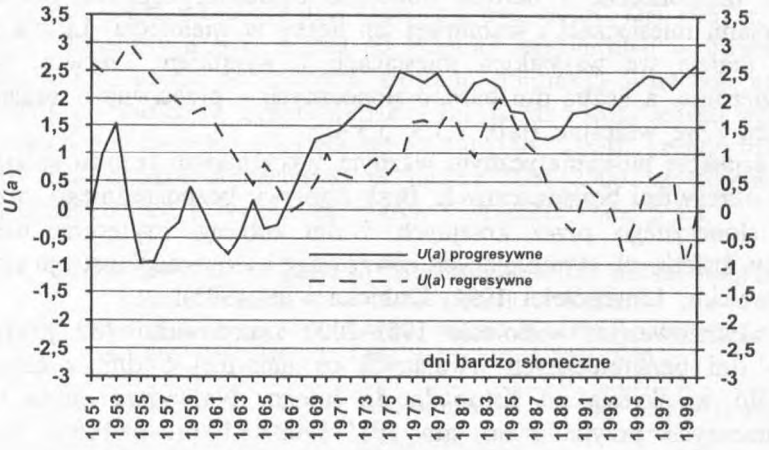
W analizowanym wieloleciu 1951–2000 zanotowano 169 przypadków ciągów dni bezsłonecznych trwających co najmniej 5 dni, z czego 85% wystąpiło w okresie od listopada do lutego. Najwyższa suma okresów bezsłonecznych przypada na lata 1951–1960, 41 przypadków. Najniższą frekwencją wyróżnia się ostatnia dekada (lata 1991–2000), kiedy to liczba okresów bez słońca była niższa o 32% od sumy zanotowanej w dekadzie I.

Najdłuższy okres bezsłoneczny w wieloleciu, 15 dni, wystąpił dwukrotnie, i trwał od 2 grudnia do 16 grudnia 1959 r. oraz od 4 stycznia do 18 stycznia 1987 r.



Ryc. 5.3.9. Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznej liczby dni bezsłonecznych w Łodzi w latach 1951–2000

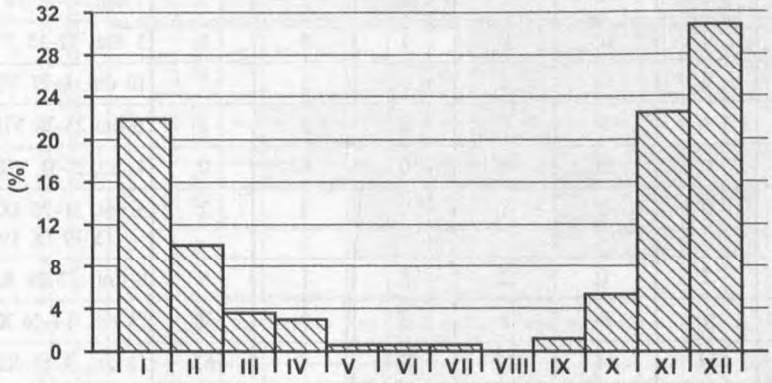
Fig. 5.3.9. Course of the sequence values of Mann-Kendall test for annual totals of the number of sunless days. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$



Ryc. 5.3.10. Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznej liczby dni bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.3.10. Course of the sequence values of Mann-Kendall test for annual totals of the number of very sunny days. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$

W przebiegu rocznym okresy co najmniej 5-dniowe braku dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego najczęściej występują w grudniu (30,8% ogółu przypadków w wieloleciu), a ich brak w całym wieloleciu odnotowano w sierpniu. Miesiące od maja do lipca charakteryzowały się jednokrotnym w 50-leciu wystąpieniem co najmniej 5-dniowego okresu bezsłonecznego (tab. 5.3.5, ryc. 5.3.11). Analiza poszczególnych dekad wykazała wyraźny spadek liczby okresów z deficytem bezpośredniego promieniowania słonecznego w styczniu i grudniu, najsilniejszy spadek odnotowano w ostatniej dekadzie. Zwarte, co najmniej 5-dniowe okresy bezsłoneczne mogą nie wystąpić w miesiącach od marca do września (tab. 5.3.5).



Ryc. 5.3.11. Frekwencja co najmniej 5-dniowych ciągów dni bezsłonecznych w roku w Łodzi w latach 1951–2000

Fig. 5.3.11. Annual course of the frequency of sunless 5-day terms at the least in Łódź in the period 1951–2000

Zwarte okresy dni bez dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego pogrupowano wg czasu ich trwania na trzy grupy: 2–4 dni (krótkie okresy bezsłoneczne), 5–10 dni (długie okresy bezsłoneczne), 11–15 dni (bardzo długie okresy bezsłoneczne).

W analizowanym 50-leciu wystąpiło 841 krótkich okresów bezsłonecznych (tab. 5.3.6), co daje przeciętną frekwencję 17 okresów w roku. Najliczniej krótkie okresy bez słońca wystąpiły w latach 1971–1980, przeciętnie 18,1 w roku, a najrzadziej pojawiały się w dekadzie I, przeciętnie 14,2 razy w roku. W przebiegu rocznym największą frekwencją 2–4 dniowych ciągów dni bez dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego charakteryzuje się grudzień, 159 przypadków w 50-leciu (przeciętnie 3,2 w miesiącu), tab. 5.3.6. Krótki deficyt usłonecznienia najrzadziej pojawia się w sierpniu, wystąpił 8 razy w wieloleciu (przeciętnie 0,2 w miesiącu). Dekada I wyróżnia się na tle wielolecia brakiem w sierpniu krótkich okresów bezsłonecznych.

Tabela 5.3.5. Liczba co najmniej 5-dniowych ciągów dni bezsłonecznych w Łodzi w wieloleciu i poszczególnych dekadach okresu 1951–2000

Table 5.3.5. The number of sunless 5-day terms at the least in long-term period and in particular decades in 1951–2000 in Łódź

Miesiące	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	1951–2000	Najdłuższe okresy bezsłoneczne
I	11	6	8	7	5	37	15 dni, 4–18 I 1987 r.
II	3	2	6	2	4	17	11 dni, 3–13 II 1971 r. 3–13 II 1980 r.
III	3	1	1	1	0	6	9 dni, 9–17 III 1954 r.
IV	0	3	1	0	1	5	7 dni, 6–12 IV 1968 r.
V	0	0	0	1	0	1	5 dni, 11–15 V 1984 r.
VI	0	0	0	0	1	1	10 dni, 8–17 VI 1997 r.
VII	1	0	0	0	0	1	6 dni, 23–28 VII 1960 r.
VIII	0	0	0	0	0	0	4 dni, 28–31 VIII 1963 r.
IX	0	0	1	0	1	2	5 dni, 21–25 IX 1979 r. 15–19 IX 1995 r.
X	2	1	2	3	1	9	8 dni, 22–29 X 1966 r.
XI	10	8	5	7	8	38	13 dni, 14–26 XI 1997 r.
XII	11	11	12	11	7	52	15 dni, 2–16 XII 1959 r.
Suma	41	32	36	32	28	169	

Długie okresy bezsłoneczne wystąpiły 153 razy w 50-leciu (przeciętnie 3,1 w roku). Najwięcej odnotowano ich w dekadzie I – 38, a najmniej w dekadzie V – 24. Najczęściej występują w grudniu – 46 przypadków (przeciętnie 0,9 w miesiącu). Ich brak stwierdzono w sierpniu. Niską frekwencją długich okresów bezsłonecznych cechują się miesiące od maja do lipca (0,02). 5–10-dniowe ciągi dni bezsłonecznych mogą nie pojawić się w okresie od marca do września (tab. 5.3.6).

W latach 1951–2000 zanotowano 16 bardzo długich okresów bezsłonecznych, trwających 11–15 dni (tab. 5.3.6). Najwięcej tych okresów – 6, przypada na lata 1971–1980, a najmniej – 2 – na dekadę II i V. W przebiegu rocznym największą frekwencją bardzo niekorzystnych okresów deficytu usłonecznienia, przeciętnie 0,1, charakteryzuje się grudzień. W miesiącach od marca do października nie odnotowano ich wystąpienia.

Całkowity brak dni bezsłonecznych obserwowano w miesiącach od kwietnia do września (najczęściej w sierpniu) w następujących latach: kwiecień – 2000 r.; maj – 1989, 1990, 1999 r.; czerwiec – 1953, 1957, 1963, 1970, 1991 r.; lipiec – 1962, 1991, 1993, 1995 r.; sierpień – 1952, 1955, 1957, 1961, 1967, 1968, 1972, 1984, 1992, 1993, 1998, 1999, 2000 r.; wrzesień – 1960 r.

Tabela 5.3.6. Frekwencja zwartych okresów bezsłonecznych w Łodzi w wieloleciu i poszczególnych dekadach okresu 1951–2000
Table 5.3.6. The frequency of sunless terms in Łódź in long-term period and in particular decades in 1951–2000

Miesiące	2–4 dni bezsłoneczne						5–10 dni bezsłonecznych						11–15 dni bezsłonecznych					
	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	1951–2000	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	1951–2000	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	1951–2000
I	28	27	30	33	26	144	11	6	7	6	4	34	0	0	1	1	0	2
II	26	32	23	25	29	135	3	2	4	2	4	15	0	0	2	0	0	2
III	10	19	14	16	9	68	3	1	1	1	0	6	0	0	0	0	0	0
IV	9	7	10	7	8	41	0	3	1	0	1	5	0	0	0	0	0	0
V	4	8	10	1	4	27	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
VI	1	2	1	6	8	18	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
VII	4	2	2	3	7	18	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
VIII	0	3	2	2	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IX	4	6	6	7	8	31	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0
X	10	14	20	12	16	72	2	1	2	3	1	9	0	0	0	0	0	0
XI	16	31	32	19	22	120	9	7	3	8	6	33	1	1	2	0	1	5
XII	30	29	31	31	38	159	9	10	11	10	6	46	2	1	1	2	1	7
Suma	142	180	181	162	176	841	38	30	30	31	24	153	3	2	6	3	2	16

6. ULTRAFIOLETOWE I CAŁKOWITE PROMIENIOWANIE SŁONECZNE W CENTRUM ŁODZI W LATACH 1997–2001

6.1. ZNACZENIE PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W ŚRODOWISKU MIEJSKIM. POMIARY ULTRAFIOLETU W EUROPIE I POLSCE

Współczesny wskaźnik urbanizacji Polski wynosi 61,8% (dane z 2000 r.), co oznacza, że ponad połowa ludności jest mieszkańcami miast. W aspekcie bioklimatycznym środowisko życia człowieka w miastach ma wiele cech negatywnych. Człowiek w obszarach zurbanizowanych narażony jest na oddziaływanie bodźców atmosferycznych często zaburzających równowagę ustrojową, np. zła jakość powietrza czy zmodyfikowane stosunki aerodynamiczne, termiczne i radiacyjne (Flemming 1983). Zespół bodźców radiacyjnych ze względu na kompleksowe działanie – fotochemiczne, termiczne, bakteriobójcze i psychiczne jest w bioklimatologii człowieka uważany za pierwszorzędny czynnik atmosferyczny stymulujący organizm człowieka (Jankowiak 1976). Bodźce radiacyjne ocenia się na podstawie natężenia promieniowania słonecznego i usłonecznienia. Bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego na człowieka polega m.in. na pobudzaniu światłoczułych komórek oka i odbieraniu wrażeń wizualnych oraz aktywizowaniu procesów biologicznych organizmu (Kozłowska-Szczęsna i in. 1997). Najintensywniejsze bodźce dla człowieka niesie nadfioletowa część widma promieniowania słonecznego (przy powierzchni ziemi rejestrowane są głównie fale w zakresie 280–400 nm). Promieniowanie UVB (280–320 nm) jest odpowiedzialne za najgroźniejsze w skutkach interakcje z biosferą, tj. inicjację procesów nowotworowych, mutacje genetyczne (Słomka K., Słomka J. 1992; Horneck 1995; Longstreth i in. 1998). Najnowsze doniesienia naukowe w tej dziedzinie wiedzy przedstawiane są przez interdyscyplinarne zespoły badawcze działające w ramach Programu Środowiskowego Narodów Zjednoczonych (UNEP) (np. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 46, 1998). Naukowcy są zgodni co do wzrostu ryzyka zachorowań na schorzenia oczu, skóry, systemu immunologicznego w wyniku udokumentowanych spadków stężeń ozonu w atmosferze powodujących wzrost niebezpiecznego biologicznie promieniowania UVB (Longstreth i in. 1998). Pomiary natężenia

tego wysokoenergetycznego pasma promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi z uwagi na ścisłą korelację ze stężeniem ozonu towarzyszą najczęściej Systemowi Globalnego Monitoringu Ozonu WMO i są bardzo rozpowszechnione na całej kuli ziemskiej (np. http://www.weathercenter.com/updates.tampcast.htm, http://www.ozone.fmi.fi/o3group/o3home.htm i inne, Vanicek i in. 2000). Współczesne badania dowodzą także istotnej roli promieniowania UVA (320–400 nm) w relacjach ze sferą ożywioną Ziemi. Istnieją epidemiologiczne dowody negatywnego oddziaływania UVA – intensyfikuje ono rumień skóry, wywołuje reakcje fotoalergiczne, fotodermatozy, jest ważnym czynnikiem ryzyka wystąpienia chorób oczu (zapalenia spojówek, katarakty), inicjuje procesy starzenia skóry itd. (Taylor i in. 1989, Diffey 1991). Pozytywnym aspektem oddziaływania promieniowania ultrafioletowego w środowisku są jego zdolności bakteriobójcze i dezynfekujące, poprawiające stan sanitarny powietrza (eliminacja bakterii, wirusów, zarodników pleśni itd.), co ma szczególne znaczenie w zanieczyszczonym środowisku miejskim. Korzystne oddziaływanie ultrafioletu na organizmy ludzi i zwierząt przejawia się w biosyntezie witamin i pigmentu, podnoszeniu poziomu hemoglobiny i wzrostu liczby erytrocytów, zwiększeniu odporności organizmu, stymulowaniu układu nerwowego. Omówione tu negatywne i pozytywne aspekty oddziaływania ultrafioletowego promieniowania Słońca są ważnym argumentem przemawiającym za popularyzacją monitoringu tego elementu meteorologicznego, szczególnie w obszarach zurbanizowanych. Pod auspicjami Światowej – Organizacji Meteorologicznej (WMO), Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), Programu Środowiskowego Narodów Zjednoczonych (UNEP) rozwija się współpraca międzynarodowa w zakresie monitoringu i prognozowania wartości promieniowania UV, do której włączona jest także Polska. Kraje europejskie i pozaeuropejskie uczestniczące w międzynarodowych programach badawczych związanych z monitoringiem i prognozowaniem promieniowania UV to Austria, Belgia, Czechy, Dania, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Niemcy, Polska, Portugalia, Szwajcaria i Włochy oraz Argentyna, Australia, Japonia, Kanada, Nowa Zelandia, Tajwan, USA (Vanicek i in. 2000). Zagadnieniu pomiarów i opracowań klimatologicznych dotyczących promieniowania ultrafioletowego nadano praktyczny wymiar, tworząc programy powszechnej informacji o promieniowaniu UV. Codzienne prognozy tzw. Indeksu UV (zdefiniowany przez WMO i WHO bezwymiarowy wskaźnik uzyskany w wyniku pomnożenia półgodzinnej maksymalnej w ciągu dnia dawki promieniowania UVB przez 40, uzyskane wartości mieszczą się w granicach 0–16, wartości powyżej 10 cechują strefę okołorównikową, wartość 7 cechuje wybrzeże Bałtyku latem, wartość 9 obserwowana jest latem

w Tatrach) są sporządzane w wielu krajach (w Polsce przez Ośrodek Aerologii IMGW w Legionowie), a efektem współpracy międzynarodowej są mapy przestrzennego rozkładu Indeksu UV dla całego obszaru Europy i kuli ziemskiej, udostępniane w Internecie i Biuletynach Meteorologicznych (Lityńska 2000; Vanicek i in. 2000).

Udokumentowane w ostatnich latach negatywne oddziaływanie w środowisku pasma UVA obok dobrze poznanych skutków promieniowania UVB przyczyniło się do rozszerzania monitoringu natężenia całkowitego pasma ultrafioletu. W literaturze klimatologicznej dotyczącej mniej popularnych serii pomiarów ultrafioletu całkowitego (UVA+UVB) przedstawiono wyniki analiz dla kilku stacji z obszaru Europy, m.in. Bratysławy (Słowacja; Zavodska, Reichrt 1985), Poczdamu (Niemcy; Feister, Grasnick 1992), Walencji (Hiszpania; Martinez-Lozano, Casanovas 1994; Martinez-Lozano i in. 1996, 1999), Grenady (Hiszpania; Foyo-Moreno i in. 1998), w Innsbrucku, w Jungfraujoch – w Alpach Szwajcarskich (Austria, Ambach i in. 1991, Blumthaler i in. 1985, 1994).

W Polsce monitoring promieniowania ultrafioletowego obejmuje głównie pomiary UV-B i jest prowadzony w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki PAN w Belsku od 1975 r. oraz w sieci meteorologicznej IMGW na stacjach Łeba, Legionowo, Kasprowy Wierch od 1993 r. Opracowane wyniki serii pomiarowych zostały przedstawione w wielu pracach, m.in. autorstwa Jana Słomki (1988, 1993) i Krystyny Słomki (1976, 1978, 1979,1993). Wieloletnie trendy promieniowania UVB w Belsku w odniesieniu do wieloletniej zmienności ozonu nad Polska przedstawił J. W. Krzyścin (1996).

Pomiary natężenia całkowitego ultrafioletu UVA + UVB rozpoczęto dopiero w drugiej połowie lat 90-tych w Łodzi, Warszawie, Lublinie na automatycznych stacjach meteorologicznych prowadzonych przez jednostki naukowe Uniwersytetu Łódzkiego, Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Warszawie, Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Wyniki pierwszych serii pomiarów promieniowania UVA + UVB zostały opublikowane dla Łodzi (Podstawczyńska, Fortuniak 1998; Podstawczyńska-Bienias 2000a, 2000b, 2001; Podstawczyńska 2002; Podstawczyńska, Pawlak 2003) i dla Warszawy (Błażejczyk 2002; Błażejczyk, Baranowski 2003).

6.2. PRZEBIEG ROCZNY I CZASOWA ZMIENNOŚĆ SEZONOWYCH, MIESIĘCZNYCH I DOBOWYCH SUM ENERGII CAŁKOWITEGO I ULTRAFIOLETOWEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA TLE SUM ENERGII NA GÓRNEJ GRANICY ATMOSFERY

Średnia roczna suma energii całkowitego promieniowania słonecznego w centrum Łodzi w latach 1997–2001 wynosi 3710,8 MJm^{-2}, podczas gdy roczna suma promieniowania ultrafioletowego wynosi 154,1 MJm^{-2}, co stanowi 4% energii promieniowania w całkowitym zakresie widma. Najwyższa w analizowanym 5-leciu suma roczna promieniowania całkowitego nie przekroczyła 3832,9 MJm^{-2} (1999 r.), a promieniowania ultrafioletowego 160,6 MJm^{-2} (2000 r.) (tab. 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3). Zakres wahań sum rocznych promieniowania całkowitego i UV w latach 1997–2001 wynosił odpowiednio 274,5 MJm^{-2} i 12,9 MJm^{-2}, co stanowi 7,4 i 8,4% średniej sumy rocznej. Zarejestrowane w Łodzi roczne sumy energii całkowitego promieniowania słonecznego odpowiadają średnim wieloletnim wartościom charakterystycznym dla tej szerokości geograficznej Polski (Miara i in. 1987, Bogdańska, Podogrocki 2000). Podobnie, roczne sumy energii całkowitego ultrafioletu (UVA+UVB) rejestrowane w Łodzi zawierające się w przedziale 4–5% energii całkowitego promieniowania słonecznego, są zgodne z wynikami opublikowanymi w literaturze klimatologicznej dotyczącej serii pomiarów całkowitego ultrafioletu na stacjach europejskich. Sumy sezonowe i miesięczne energii promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa ilustrują nierównomierny dopływ energii słonecznej w ciągu roku, wynikający z uwarunkowań astronomicznych, meteorologicznych (zachmurzenie) i wpływów antropogenicznych, determinujących w dużym stopniu przezroczystość atmosfery. Na okres wiosenno-letni (III–VIII) przypada 78% rocznej sumy energii całkowitego i 79% ultrafioletowego promieniowania słonecznego. W zimie dopływ promieniowania słonecznego jest znikomy, stanowiąc 7% (całkowite) i 6% (UV) całkowitej sumy rocznej. Sumy miesięczne promieniowania słonecznego przewyższające 10% sumy rocznej, tj. powyżej 400 MJm^{-2} (całkowite) i powyżej 15 MJm^{-2} (UV), mogą wystąpić w okresie od kwietnia do września, tab. 6.2.2, 6.2.3.

Ekstremalne sumy miesięczne promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery (szerokość geograficzna stacji Łódź-Lipowa) zgodnie z uwarunkowaniami astronomicznymi przypadają na grudzień i czerwiec. Na stacji Łódź-Lipowa roczne minimum sum miesięcznych energii promieniowania słonecznego w latach 1997–2001 przypada na grudzień (48,7 MJm^{-2} – całkowite; 2,1 MJm^{-2} – UV), a roczne maksimum nietypowo występuje w maju (620,9 MJm^{-2} – całkowite; 25,3 MJm^{-2} – UV), tab. 6.2.1.

Tabela 6.2.1. Sumy miesięczne i roczne całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa (M_t, M_{uv}) i na górnej granicy atmosfery (M_{t0}, M_{uv0}) oraz wartości współczynnika transmisji promieniowania (T_t, T_{uv}) w latach 1997–2001

Table 6.2.1. The monthly and annual sums of UV and total solar radiation at the ground level at Łódź-Lipowa station (M_t, M_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (M_{t0}, M_{uv0}) and the values of transmission coefficient of solar radiation in the period 1997–2001

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
M_t (MJm^{-2})	73,0	121,6	270,6	387,0	620,9	564,0	528,9	521,4	320,8	180,4	73,6	48,7	3710,8
M_{t0} (MJm^{-2})	240,0	369,0	674,0	950,0	1240,0	1323,0	1313,0	1097,0	773,0	502,0	276,0	195,0	8952,0
T_t (%)	30,4	32,9	40,1	40,7	50,1	42,6	40,3	47,5	41,5	35,9	26,6	25,0	41,4
M_{uv} (MJm^{-2})	2,8	4,9	10,7	15,8	25,3	24,0	23,0	21,6	13,3	7,4	3,1	2,1	154,1
M_{uv0} (MJm^{-2})	19,0	29,0	53,0	75,0	98,0	105,0	104,0	87,0	61,0	40,0	22,0	15,0	708,0
T_{uv} (%)	14,7	17,0	20,2	21,1	25,8	22,8	22,1	24,8	21,8	18,5	14,1	14,0	21,8
Wysokość Słońca dla 15. dnia miesiąca (°)	17,2	24,9	36,2	47,7	56,9	61,5	60,0	53,2	42,7	31,1	21,0	15,3	

Wymienione wartości przeciętnie stanowią 1,3 i 1,4% (grudzień) oraz 16,7% i 16,4% (maj) rocznej sumy energii (tab. 6.2.2., 6.2.3). Duże zróżnicowanie sum sezonowych i miesięcznych promieniowania słonecznego w roku jest typową cechą solarną klimatu Polski. Jest również osobliwością klimatu Łodzi, gdzie sumy energii słonecznej notowane latem prawie siedmiokrotnie przewyższają sumy notowane zimą, a najwyższe sumy miesięczne promieniowania słonecznego przewyższają trzynastokrotnie sumy energii rejestrowane w grudniu. Majowe maksimum promieniowania całkowitego cechuje 1998, 2000 i 2001 r. W 1997 r. najwyższą sumę energii zanotowano w czerwcu, a w 1999 r. w lipcu. Wzrost sum miesięcznych promieniowania całkowitego w maju i spadek w czerwcu jest cechą charakterystyczną ostatniej dekady i został odnotowany również w innych regionach Polski, tj. na stacjach Gdynia, Kołobrzeg, Suwałki, Mikołajki, Warszawa, Zakopane i Kasprowy Wierch (Bogdańska, Podogrocki 2000). Na wszystkich wymienionych stacjach udział promieniowania w maju przewyższał sumę promieniowania całkowitego w sierpniu. Podobne tendencje cechują usłonecznienie (rozdz. 5). W przypadku ultrafioletu maj charakteryzował się niższą frekwencją najwyższych sum miesięcznych w roku. W analizowanym 5-leciu wystąpiły one w maju dwukrotnie, w 1998 i 2001 r., a w pozostałych latach maksimum przypadło dwa razy na czerwiec i raz na lipiec. Najwyższą absolutną sumę miesięczną promieniowania całkowitego i UV zanotowano w lipcu 1999 r., odpowiednio 671,1 MJm^{-2} i 28,1 MJm^{-2} (tab. 6.2.2, 6.2.3). Zakres wahań najwyższych sum miesięcznych promieniowania całkowitego i UV w latach 1997–2001 wynosił odpowiednio 62 MJm^{-2} i 3,6 MJm^{-2}, co stanowi 10 i 14,2% najwyższej średniej sumy miesięcznej. Najniższa suma miesięczna promieniowania całkowitego i UV w latach 1997–2001 wystąpiła w grudniu 1997 r., 40,4 MJm^{-2} i 1,8 MJm^{-2}. Zakres wahań sum miesięcznych promieniowania całkowitego i UV w grudniu w analizowanym okresie wynosił odpowiednio 14,3 MJm^{-2} i 0,3 MJm^{-2}, co stanowi 29,4 i 14,3% średniej sumy promieniowania słonecznego w grudniu. Zakres wahań sezonowych sum promieniowania słonecznego i ultrafioletu w 5-leciu wynosi dla wiosny 168,8 MJm^{-2} i 7,8 MJm^{-2} (13,2 i 15% średniej sumy promieniowania słonecznego wiosną), dla lata 99 MJm^{-2} i 2,5 MJm^{-2} (6,1 i 3,6% średniej sumy promieniowania słonecznego latem), dla jesieni 157,6 MJm^{-2} i 5,7 MJm^{-2} (27,4 i 24% średniej sumy promieniowania słonecznego jesienią), dla zimy 33,8 MJm^{-2} i 1,8 MJm^{-2} (13,9 i 18,2% średniej sumy promieniowania słonecznego zimą). Wśród bezwzględnych sezonowych sum promieniowania słonecznego największą zmiennością w latach 1997–2001 wyróżnia się wiosna, a najmniejszą zima.

Wielkością charakteryzującą ogólne warunki transmisji promieniowania słonecznego w atmosferze jest współczynnik transmisji (T, %). Współczynnik ten informuje, jaka część energii słonecznej na górnej granicy atmosfery

dociera do powierzchni Ziemi. W umiarkowanych szerokościach geograficznych najwyższe wartości transmisji całkowitego promieniowania słonecznego w warunkach bezchmurnego nieba wynoszą 70–85% (Iqbal 1983). W przebiegu rocznym przeciętny współczynnik transmisji całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa zmieniał się od 25,0% w grudniu, do 50,1% w maju, a średnia roczna wartość w analizowanym 5-leciu wyniosła 41,4%. Wymienione wartości współczynnika transmisji promieniowania całkowitego są zbliżone do wartości notowanych na innych stacjach Polski, tj. Wrocław, Warszawa, Gdynia, Suwałki i in. (Bryś 1994; Bogdańska, Podogrocki 2000; Podogrocki http://www.ekologika.com.pl/nauka...). Promieniowanie ultrafioletowe ulega znacznie większej ekstynkcji w atmosferze niż promieniowanie słoneczne o falach powyżej 400 nm, a wartości współczynnika transmisji promieniowania UV są średnio o połowę niższe od wartości współczynnika transmisji promieniowania całkowitego (tab. 6.2.1). W latach 1997–2001 do centrum Łodzi docierało w grudniu tylko 14% pozaatmosferycznego promieniowania UVA + UVB, podczas gdy w maju zanotowano przeciętnie 25,8% pozaatmosferycznego ultrafioletu (tab. 7.2.1).

Osobliwością solarną klimatu Polski obok nierównomiernego dopływu promieniowania słonecznego w ciągu roku jest duża zmienność sum energii promieniowania słonecznego z dnia na dzień. Tę cechę dobrze ilustrują wartości sum dobowych promieniowania słonecznego w biegu rocznym. Średnie sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski zawarte są w przedziale od 1,5 MJm^{-2} w grudniu do 20,5 MJm^{-2} w czerwcu (Paszyński, Niedźwiedź 1991). Średnie wartości promieniowania całkowitego w Łodzi w latach 1956–1975 (Miara i in. 1987, tab. 6.2.4) zmieniały się od 1,94 MJm^{-2} w grudniu do 19,16 MJm^{-2} w czerwcu. Sumy dobowe całkowitego promieniowania notowane w centrum Łodzi w latach 1997–2001 przewyższają wyżej wymienione wartości. Najniższe wartości w analizowanym 5-leciu wystąpiły w grudniu, 1,6 MJm^{-2}, a najwyższe w maju, 20,0 MJm^{-2}, co jest odchyleniem od średniego wieloletniego przebiegu rocznego, gdzie maksimum przypada w czerwcu (ryc. 6.2.1, 6.2.2, 6.2.4). Majowe maksimum promieniowania całkowitego w Łodzi przewyższa przeciętne wartości całkowitego promieniowania, rejestrowane w maju (17,2 MJm^{-2}) i czerwcu (18,9 MJm^{-2}) w Warszawie w latach 1961–1995 (Bogdańska, Podogrocki 2000). Najwyższe bezwzględne sumy dobowe całkowitego promieniowania w centrum Łodzi zanotowano 10 czerwca 2000 r., 30,4 MJm^{-2}, a bezwzględnie najniższa suma dobowa 0,25 MJm^{-2} wystąpiła 22 listopada i 12 grudnia 2001 r., ryc. 6.2.3, 6.2.4. Ekstremalne wartości na stacji Łódź-Lipowa w stosunku do ekstremalnych dobowych sum energii przypadających na płaszczyźnie horyzontalnej na górnej granicy atmosfery (44,49 MJm^{-2} i 6,02 MJm^{-2}; szerokość geograficzna stacji Łódź-Lipowa) stanowią odpowiednio 68,6 i 4,1%.

Tabela 6.2.2. Sumy roczne, sezonowe i miesięczne całkowitego promieniowania słonecznego (MJm^{-2}) oraz udział sum sezonowych i miesięcznych w sumie rocznej (%) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

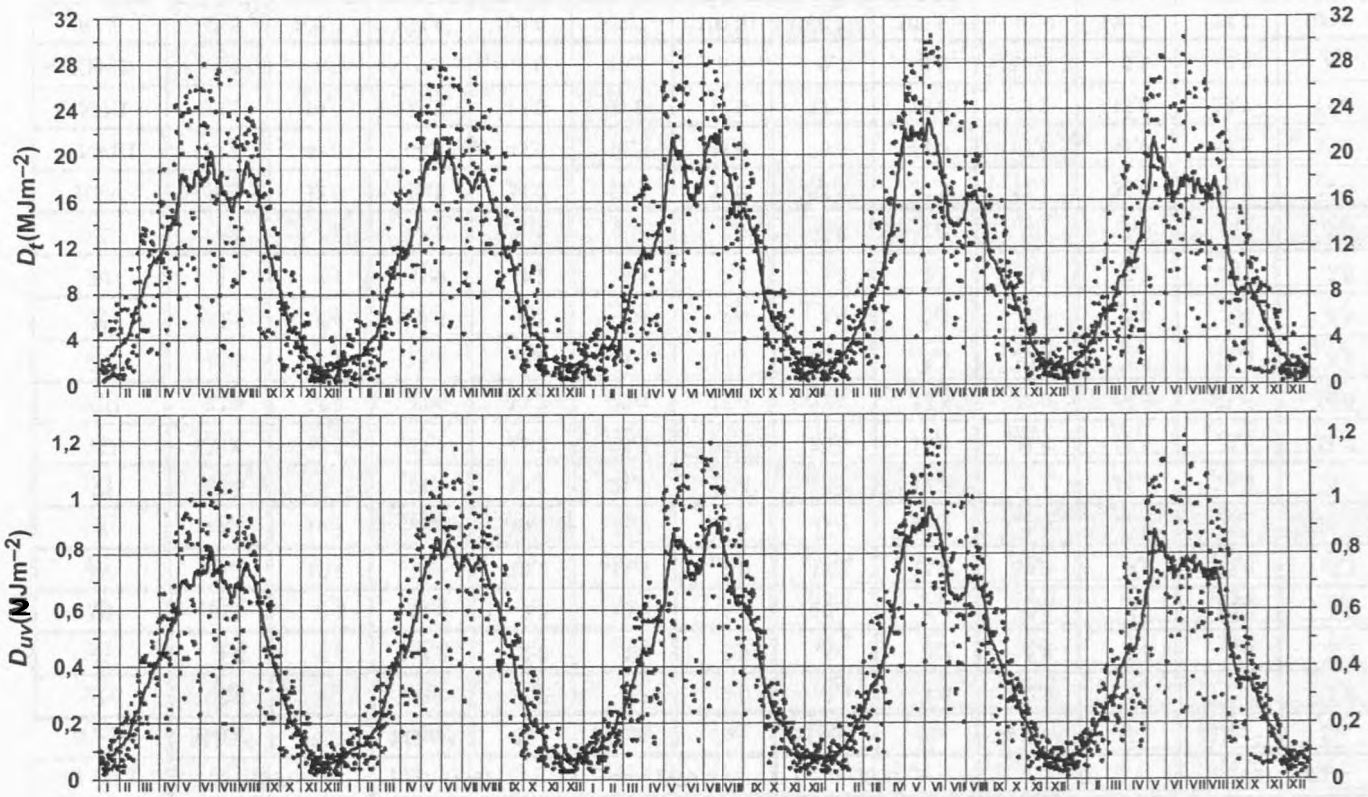
Table 6.2.2. The annual, seasonal and monthly sums of total solar radiation (MJm^{-2}) and the contribution of seasonal and monthly sums in annual sums (in %) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

	1997		1998		1999		2000		2001		1997–2001	
	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%
I	80,9	2,2	71,1	2,0	85,1	2,2	61,1	1,6	66,8	1,9	73,0	2,0
II	132,5	3,5	101,2	2,8	105,5	2,8	123,3	3,2	145,5	4,1	121,6	3,3
III	299,2	8,0	301,7	8,3	279,9	7,3	239,2	6,3	233,1	6,6	270,6	7,3
IV	420,6	11,3	373,0	10,3	340,5	8,9	463,8	12,2	336,9	9,5	387,0	10,4
V	527,4	14,1	616,2	17,1	663,0	17,3	667,1	17,5	631,1	17,7	620,9	16,7
VI	609,1	16,3	579,2	16,0	478,1	12,5	655,5	17,2	498,0	14,0	564,0	15,2
VII	486,5	13,0	521,7	14,4	671,1	17,5	428,7	11,2	536,5	15,1	528,9	14,3
VIII	569,4	15,3	490,8	13,6	495,2	12,9	520,1	13,6	531,5	14,9	521,4	14,1
IX	336,7	9,0	319,8	8,9	403,7	10,5	315,0	8,3	228,7	6,4	320,8	8,6
X	155,7	4,2	142,0	3,9	175,1	4,6	215,5	5,6	214,0	6,0	180,4	4,9
XI	75,5	2,0	42,5	1,2	83,1	2,2	78,7	2,1	88,0	2,5	73,6	2,0
XII	40,4	1,1	54,7	1,5	52,7	1,4	47,4	1,2	48,3	1,4	48,7	1,3
III–V	1247,2	33,0	1290,9	36,0	1283,4	34,0	1370,0	36,0	1201,2	34,0	1278,5	34,0
VI–VIII	1665,0	45,0	1591,7	44,0	1644,4	43,0	1604,2	42,0	1566,0	44,0	1614,3	44,0
IX–XI	567,8	15,0	504,3	14,0	661,9	17,0	609,2	16,0	530,7	15,0	574,8	15,0
XII–II	253,8	7,0	226,9	6,0	243,2	6,0	231,8	6,0	260,7	7,0	243,3	7,0
Rok	3733,8	100,0	3613,8	100,0	3832,9	100,0	3815,2	100,0	3558,5	100,0	3710,8	100,0

Tabela 6.2.3. Sumy roczne, sezonowe i miesięczne całkowitego promieniowania ultrafioletowego (MJm^{-2}) oraz udział sum sezonowych i miesięcznych w sumie rocznej (%) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table 6.2.3. The annual, seasonal and monthly sums of UV solar radiation (MJm^{-2}) and the contribution of seasonal and monthly sums in annual sums (in %) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

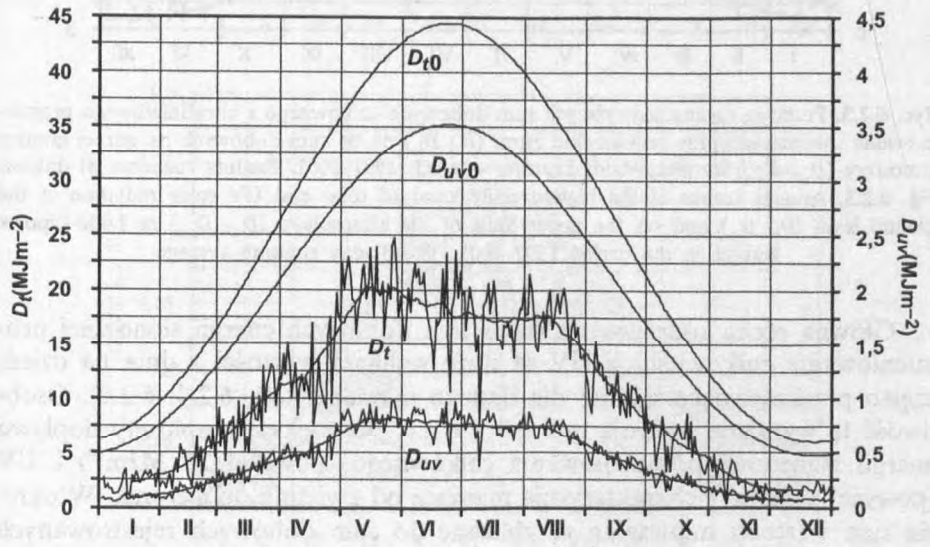
	1997		1998		1999		2000		2001		1997–2001	
	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%	MJm^{-2}	%
I	2,6	1,7	2,9	1,9	3,3	2,0	2,6	1,6	2,9	1,9	2,8	1,8
II	4,8	3,2	4,2	2,8	4,8	3,0	5,1	3,2	5,8	3,8	4,9	3,2
III	10,8	7,3	11,6	7,7	10,9	6,8	10,1	6,3	10,2	6,7	10,7	7,0
IV	16,1	10,9	15,4	10,2	14,5	9,0	18,7	11,6	14,5	9,6	15,8	10,3
V	21,1	14,2	24,8	16,5	27,0	16,9	27,0	16,8	26,4	17,4	25,3	16,4
VI	24,6	16,7	24,6	16,3	21,1	13,2	27,9	17,3	22,1	14,6	24,0	15,6
VII	20,6	13,9	22,9	15,2	28,2	17,6	20,0	12,4	23,4	15,5	23,0	14,9
VIII	22,4	15,2	20,6	13,7	20,8	13,0	22,2	13,8	22,0	14,5	21,6	14,0
IX	13,5	9,1	13,3	8,8	16,1	10,1	13,4	8,3	10,2	6,7	13,3	8,6
X	6,5	4,4	6,2	4,1	7,4	4,6	8,5	5,3	8,5	5,6	7,4	4,8
XI	3,1	2,1	1,9	1,2	3,5	2,2	3,3	2,1	3,6	2,3	3,1	2,0
XII	1,8	1,2	2,2	1,5	2,2	1,4	2,0	1,2	2,2	1,5	2,1	1,4
III-V	48,0	32,0	51,8	34,0	52,4	33,0	55,8	34,0	51,1	34,0	51,8	34,0
VI-VIII	67,6	46,0	68,0	45,0	70,1	44,0	70,0	44,0	67,6	45,0	68,6	45,0
IX-XI	23,1	16,0	21,3	15,0	27,0	17,0	25,2	16,0	22,2	15,0	23,7	15,0
XII-II	9,1	6,0	9,3	6,0	10,3	6,0	9,7	6,0	10,9	6,0	9,9	6,0
Rok	147,8	100,0	150,4	100,0	159,7	100,0	160,7	100,0	151,7	100,0	154,1	100,0



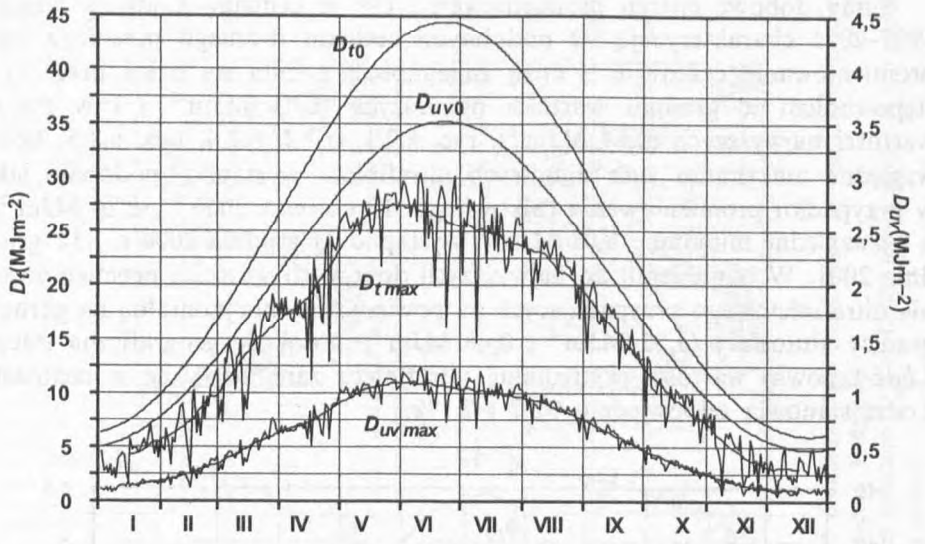
Ryc. 6.2.1. Przebieg roczny sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Linia ciągła – średnia ruchoma 31-dniowa

Fig. 6.2.1. Annual course of the daily sums of total solar radiation (D_t) and ultraviolet radiation (D_{uv}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. Solid line – 31-day running average

Sumy dobowe energii promieniowania UV w centrum Łodzi w latach 1997–2001 charakteryzują się podobnymi cechami rocznego przebiegu jak promieniowanie całkowite – dużą zmiennością z dnia na dzień oraz występowaniem w grudniu wartości najniższych (0,01 MJm^{-2}) i w maju wartości najwyższych (0,81 MJm^{-2}), ryc. 6.2.1, 6.2.2, 6.2.4, tab. 6.2.5. Bezwzględne maksimum sum dobowych ultrafioletu wystąpiło, podobnie jak w przypadku promieniowania całkowitego, 10 czerwca 2000 r., 1,24 MJm^{-2}, a bezwzględne minimum, 0,01 MJm^{-2}, wystąpiło 31 grudnia 2000 r. i 12 grudnia 2001. W odniesieniu do najwyższych dobowych wartości promieniowania ultrafioletowego przypadających na powierzchnię horyzontalną na górnej granicy atmosfery (3,52 MJm^{-2} i 0,48 MJm^{-2}; szerokość geograficzna stacji Łódź-Lipowa) wartości ekstremalne ultrafioletu zarejestrowane w centrum Łodzi stanowią odpowiednio 32,2 i 2,1%.

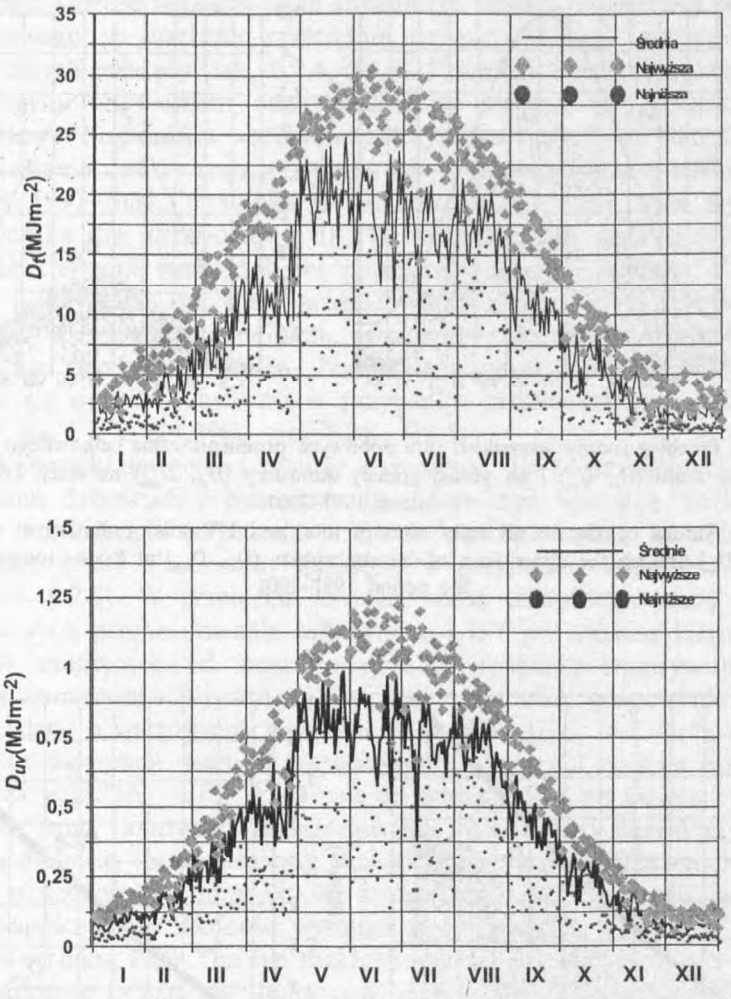


Ryc. 6.2.2. Przebieg roczny średnich sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) na tle sum dobowych na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Średnia ruchoma 31-dniowa
Fig. 6.2.2. The annual course of the mean daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) against a background of the values on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. The 31-day running average



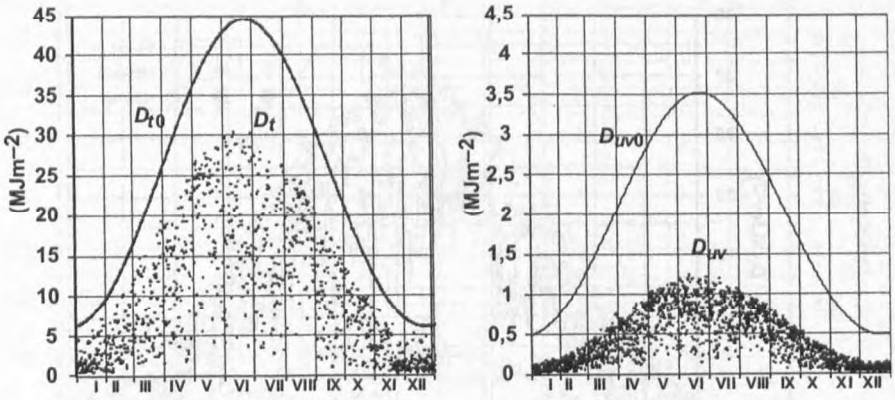
Ryc. 6.2.3. Przebieg roczny najwyższych sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) na tle sum dobowych na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Średnia ruchoma 31-dniowa
Fig. 6.2.3. Annual course of the highest daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. The 31-day running average

Główną cechą rocznego rozkładu sum dobowych energii słonecznej promieniowania całkowitego i UV są duże wahania wartości z dnia na dzień, często przekraczające średnie dla danego miesiąca (tab. 6.2.4, 6.2.5). Osobliwość tę wyraźnie ilustrują ryc. 6.2.1–6.2.5. Największe amplitudy dopływu energii słonecznej promieniowania całkowitego (powyżej 20 MJm^{-2}) i UV (powyżej 1 MJm^{-2}) charakteryzują miesiące od kwietnia do sierpnia. W okresie tym wartości minimalne są zbliżone do sum dobowych rejestrowanych w zimie, a najwyższe sumy dobowe w czerwcu mogą je przewyższać 16-krotnie (promieniowanie całkowite) i 9-krotnie (UV), tab. 6.2.4. Podstawowym czynnikiem determinującym tak wysokie amplitudy sum dobowych energii słonecznej przy powierzchni ziemi jest zachmurzenie. W okresie letnim obszary zurbanizowane w wyniku wzmożonych prądów wstępujących wyróżniają się dużym stopniem zachmurzenia konwekcyjnego, znacznie zmniejszającego ilość energii słonecznej w czasie najkorzystniejszych uwarunkowań astronomicznych dla jej dopływu do powierzchni ziemi. Chmury konwekcyjne osiągające znaczną miąższość (*Cu con*, *Cb*) mogą redukować letnie sumy dobowe promieniowania słonecznego do poziomu wartości rejestrowanych przy niskiej wysokości Słońca nad horyzontem (15–20°) (ryc. 6.2.6.).



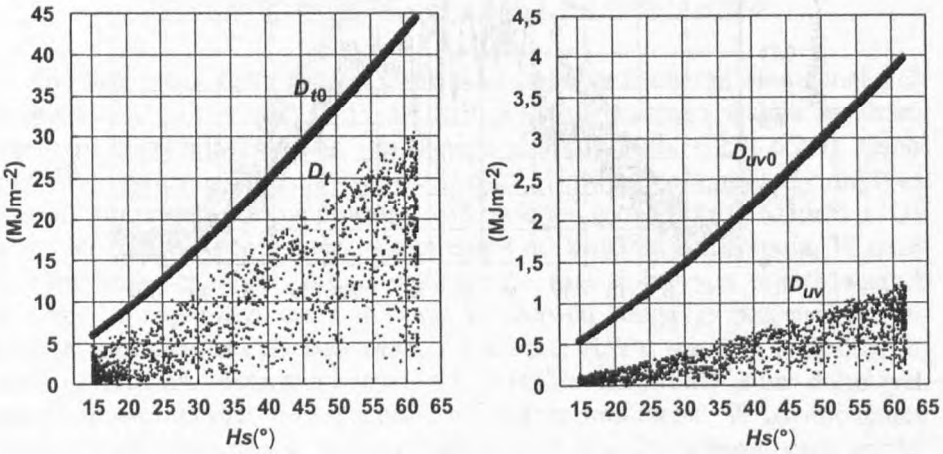
Ryc. 6.2.4. Średnie i ekstremalne sumy dobowe promieniowania całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.4. The mean and the extreme daily sums of total (D_t) and UV solar radiation (D_{uv}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.2.5. Przebieg roczny wszystkich sum dobowych promieniowania całkowitego i UV przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) i na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.5. Annual course the all daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.2.6. Sumy dobowe promieniowania całkowitego i UV przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) i na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) w funkcji wysokości Słońca nad horyzontem na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.6. The daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) as a function of the Sun height at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Zróżnicowanie szeregu sum dobowych promieniowania słonecznego dobrze ilustruje wartość współczynnika zmienności (udział procentowy odchylenia standardowego w wartości przeciętnej danego szeregu) wyznaczona dla poszczególnych miesięcy (tab. 6.2.4, 6.4.5). Promieniowanie całkowite cechuje się większymi względnymi odchyleniami od średniej niż promieniowanie ultrafioletowe. Największa wartość współczynnika zmienności sum dobowych promieniowania całkowitego, podobnie jak promieniowania ultrafioletowego w latach 1997–2001, wystąpiła w listopadzie, 72,7% i była wyższa od współczynnika dla ultrafioletu o 18,2%. Współczynnik zmienności powyżej 60% charakteryzuje sumy dobowe promieniowania całkowitego w grudniu, styczniu i lutym, a tak duże zróżnicowanie szeregu sum dobowych nie występuje w przypadku ultrafioletu, gdzie najwyższa wartość współczynnika w roku nie przekracza 54,5%. Najmniejszą zmiennością sum dobowych wyróżnia się sierpień, zarówno w przypadku promieniowania całkowitego (29,7%), jak i UV (24,3%), tab. 6.2.4, 6.2.5.

Współczynniki asymetrii i kurtozy wyznaczone dla poszczególnych miesięcy szeregu sum dobowych promieniowania całkowitego wskazują, że kryterium rozkładu normalnego (asymetria $<0,4$ i $|\text{kurtoza}| <0,8$, za: Bogdańska, Podogrocki, 2000) nie zostało spełnione w przypadku większości miesięcy (tab. 6.2.4, 6.2.5). W przebiegu rocznym cechą charakterystyczną rozkładu sum dobowych promieniowania całkowitego i UV jest zmiana kierunku asymetrii. W miesiącach od maja do września rozkłady empiryczne cechuje asymetria lewostronna (ujemna), świadcząca o tendencji grupowania wartości w przedziałach o wartościach wyższych od średniej (ryc. 6.2.7a, b, c). W tej porze roku najwyższa wartość współczynnika skośności cechuje maj, –0,77, a najniższa wrzesień, –0,15. W okresie od października do kwietnia rozkłady empiryczne sum dobowych promieniowania całkowitego charakteryzują się asymetrią dodatnią (prawostronną), oznaczającą największą frekwencję w przedziałach o wartościach niższych od średniej (ryc. 6.2.7a, c, d). Najwyższa wartość współczynnika skośności wystąpiła w grudniu, 1,2, a najniższa w kwietniu i październiku, 0,09. Ten typ rozkładu wynika z dominującej roli czynnika astronomicznego (wysokości słońca nad horyzontem, długości dnia) w chłodnym okresie roku. W pozostałych miesiącach obok uwarunkowań astronomicznych ważną rolę odgrywa cyrkulacja atmosferyczna. W przebiegu rocznym największą asymetrią rozkładu sum dobowych promieniowania całkowitego charakteryzuje się grudzień (1,2). Współczynnik kurtozy sum dobowych promieniowania całkowitego, obrazujący koncentracją wartości wokół średniej, jest ujemny we wszystkich miesiącach z wyjątkiem grudnia, w przypadku promieniowania UV przyjmuje on wartość ujemną także w grudniu (tab. 6.2.5, 6.2.6). Kurtoza ujemna świadczy o rozproszeniu wartości wokół średniej (rozkład empiryczny jest spłaszczony w stosunku do rozkładu normalnego), największe rozproszenie sum dobowych promieniowania całkowitego cechuje listopad (kurtoza – 0,98), a promieniowanie UV – styczeń (–0,78).

Tabela 6.2.4. Podstawowe charakterystyki statystyczne sum dobowych promieniowania całkowitego (D_t, MJm^{-2}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Sumy dobowe promieniowania całkowitego w Łodzi w latach 1956–1975 wg Miara, Paszyński, Grzybowski (1987). Sumy dobowe promieniowania całkowitego na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, MJm^{-2}) na szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa

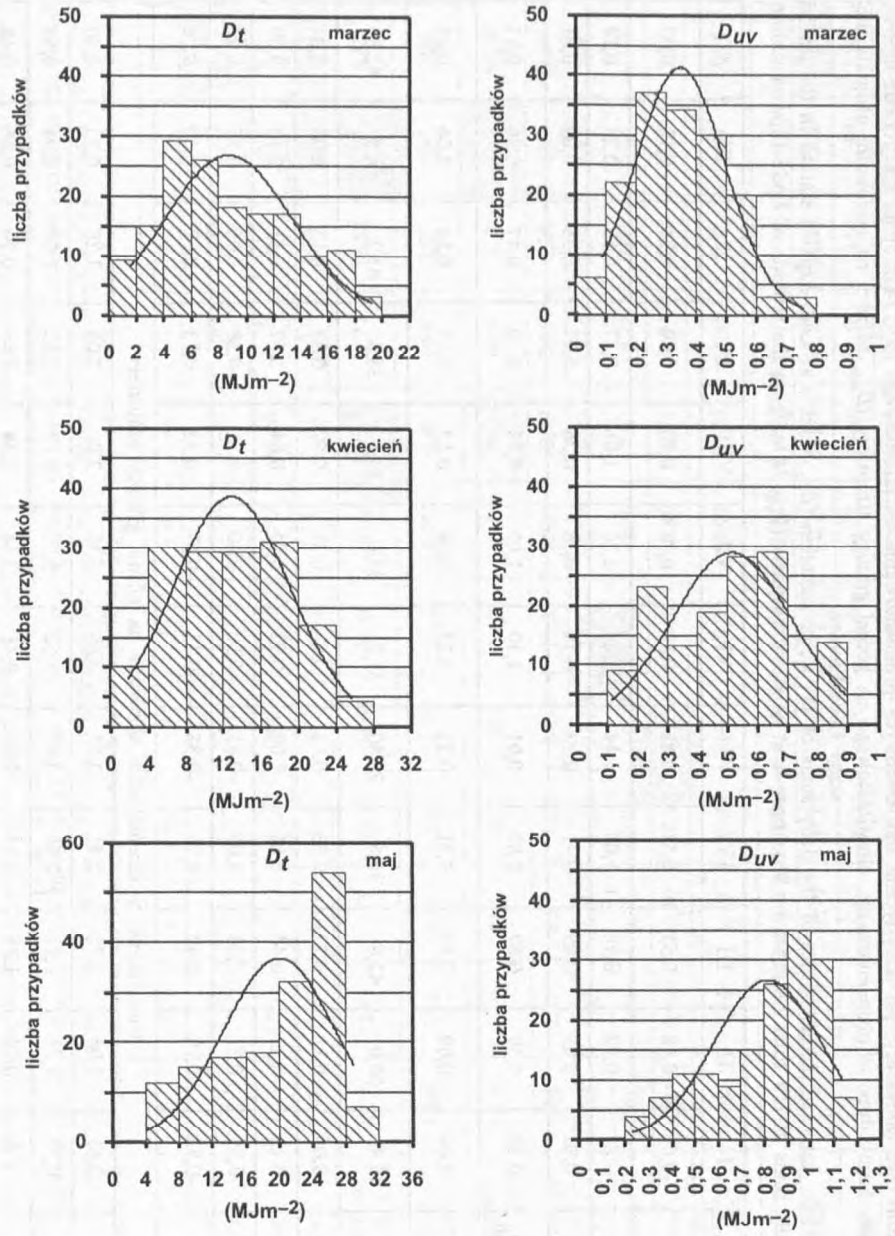
Table 6.2.4. The basic statistical characteristics of the daily sums of total solar radiation (D_t, MJm^{-2}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. The daily sums of total solar radiation in Łódź in the period 1956-1975 by K. Miara, J. Paszyński, J. Grzybowski (1987). The daily sums of total solar radiation on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, MJm^{-2}) on the latitude of Łódź-Lipowa station

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
D_t średnie 1997–2001	2,42	4,40	8,73	12,90	20,03	18,80	17,06	16,82	10,69	5,82	2,63	1,57
D_t max	7,13	12,11	19,24	25,73	28,91	30,43	29,65	24,50	20,28	13,39	8,18	5,12
D_t min	0,42	0,50	1,54	1,81	4,05	1,89	2,75	5,03	1,01	0,87	0,25	0,25
Zakres wahań D_t max – D_t min	6,71	11,61	17,71	23,92	24,86	28,54	26,90	19,47	19,27	12,52	7,94	4,87
Odchylenie standardowe	1,58	2,84	4,64	6,23	6,78	7,13	6,76	4,99	4,96	3,07	1,90	1,04
Współczynnik zmienności (%)	65,3	64,5	53,1	48,3	33,8	37,9	39,6	29,7	46,4	52,7	72,2	66,20
Dolny kwartyl	1,06	2,17	4,87	7,22	14,76	14,55	12,00	12,79	7,15	3,28	1,09	0,77
Górny kwartyl	3,52	6,02	12,47	17,28	25,29	24,91	22,77	20,97	14,60	8,17	3,81	2,06
Asymetria	0,75	0,84	0,35	0,09	–0,77	–0,37	–0,26	–0,41	–0,15	0,09	0,88	1,20
Kurtoza	–0,41	–0,004	–0,90	–0,95	–0,59	–0,67	–0,88	–0,84	–0,91	–0,98	–0,07	1,18
D_t średnie 1956–1975	2,54	4,46	8,72	12,64	16,57	19,16	17,99	15,80	11,45	6,32	2,94	1,94
Całkowite promieniowanie słoneczne na górnej granicy atmosfery												
D_{t0} średnie	7,73	13,16	21,74	31,68	40,01	44,11	42,36	35,37	25,77	16,21	9,21	6,28
D_{t0} max	9,85	16,72	26,65	36,13	42,92	44,49	44,22	39,44	30,54	20,68	11,94	7,00
D_{t0} min	6,28	10,04	17,01	27,00	36,43	43,08	39,67	30,88	21,01	12,16	7,10	6,02

Tabela 6.2.5. Podstawowe charakterystyki statystyczne sum dobowych promieniowania ultrafioletowego (D_{uv}, MJm^{-2}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Sumy dobowe promieniowania ultrafioletowego na górnej granicy atmosfery (D_{uv0}, MJm^{-2}) na szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa

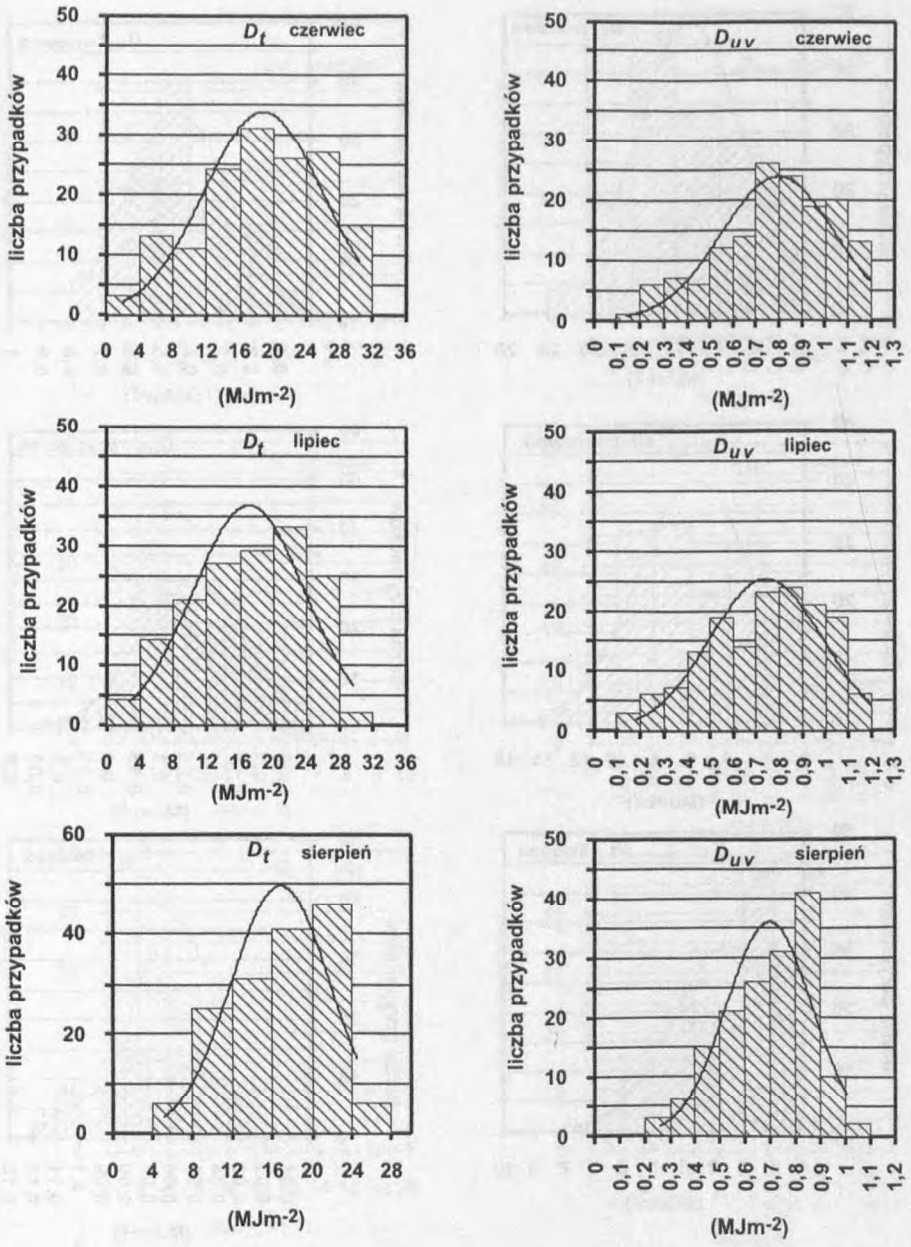
Table 6.2.5. The basic statistical characteristics of the daily sums of UV solar radiation (D_{uv}, MJm^{-2}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001.The daily sums of UV solar radiation on the upper limit of the atmosphere (D_{uv0}, MJm^{-2}) on the latitude of Łódź–Lipowa station

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
D_{uv} średnie 1997–2001	0,09	0,18	0,35	0,53	0,81	0,80	0,74	0,70	0,44	0,24	0,11	0,07
D_{uv} max	0,21	0,42	0,76	1,00	1,14	1,24	1,20	1,01	0,77	0,52	0,28	0,14
D_{uv} min	0,02	0,03	0,09	0,11	0,23	0,14	0,18	0,26	0,07	0,05	0,02	0,01
Zakres wahań D_{uv} max–D_{uv} min	0,19	0,39	0,67	0,89	0,91	1,10	1,02	0,75	0,70	0,47	0,26	0,13
Odchylenie standardowe	0,04	0,09	0,15	0,21	0,23	0,25	0,24	0,17	0,17	0,10	0,06	0,03
Współczynnik zmienności (%)	44,4	50,0	42,8	39,6	28,40	31,2	32,4	24,3	38,6	41,2	54,5	42,80
Dolny kwartyl	0,05	0,11	0,22	0,33	0,65	0,67	0,57	0,57	0,32	0,15	0,06	0,04
Górny kwartyl	0,13	0,23	0,44	0,66	1,00	0,99	0,94	0,84	0,57	0,31	0,16	0,09
Asymetria	0,39	0,51	0,35	0,06	–0,81	–0,50	–0,40	–0,51	–0,28	0,05	0,55	0,27
Kurtoza	–0,78	–0,19	–0,40	–0,76	–0,36	–0,33	–0,67	–0,53	–0,73	–0,67	–0,60	–0,76
Ultrafioletowe promieniowanie słoneczne na górnej granicy atmosfery												
D_{uv0} średnie	0,61	1,04	1,72	2,51	3,17	3,49	3,35	2,80	2,04	1,28	0,73	0,50
D_{uv0} max	0,78	1,32	2,11	2,86	3,40	3,52	3,50	3,12	2,42	1,64	0,94	0,55
D_{uv0} min	0,50	0,79	1,35	2,14	2,88	3,41	3,14	2,44	1,66	0,96	0,56	0,48



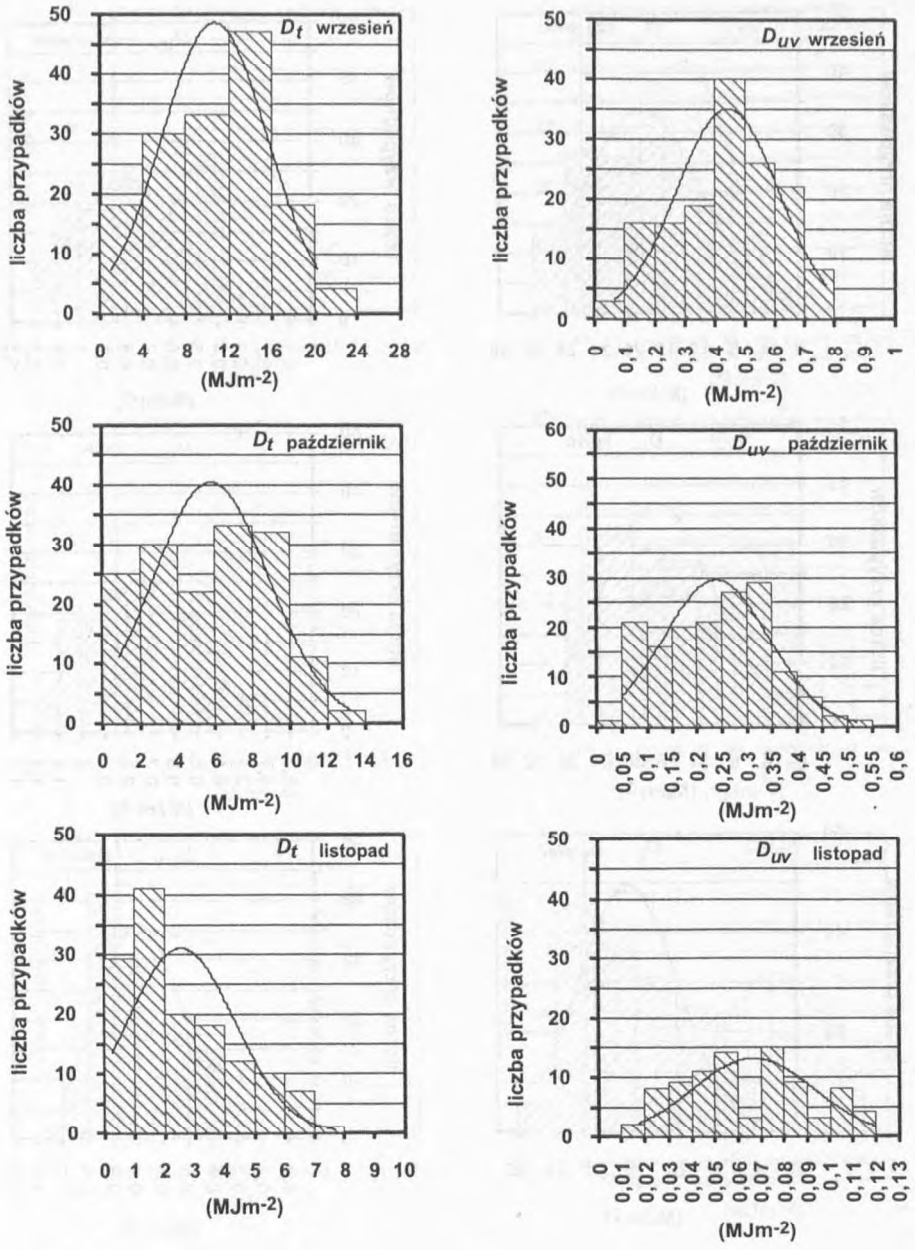
Ryc. 6.2.7a. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego wiosną (III–V) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.7a. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in spring (III–V) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



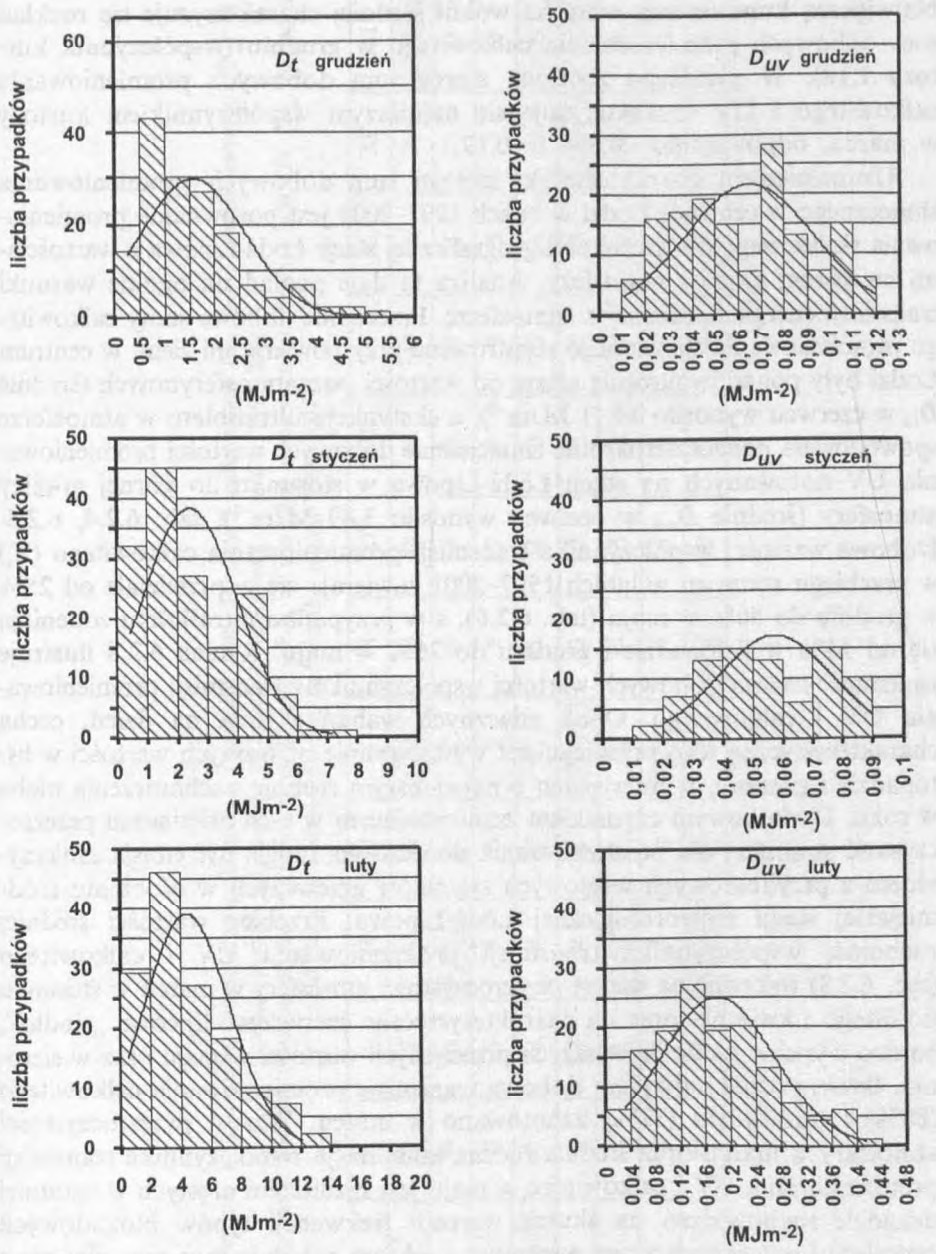
Ryc. 6.2.7b. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego latem (VI–VIII) na stacji Łodź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.7b. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in summer (VI–VIII) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.2.7c. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego jesienią (IX–XI) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.7c. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in autumn (IX–XI) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.2.7d. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego w zimie (XII–II) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.2.7d. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in winter (XII–II) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

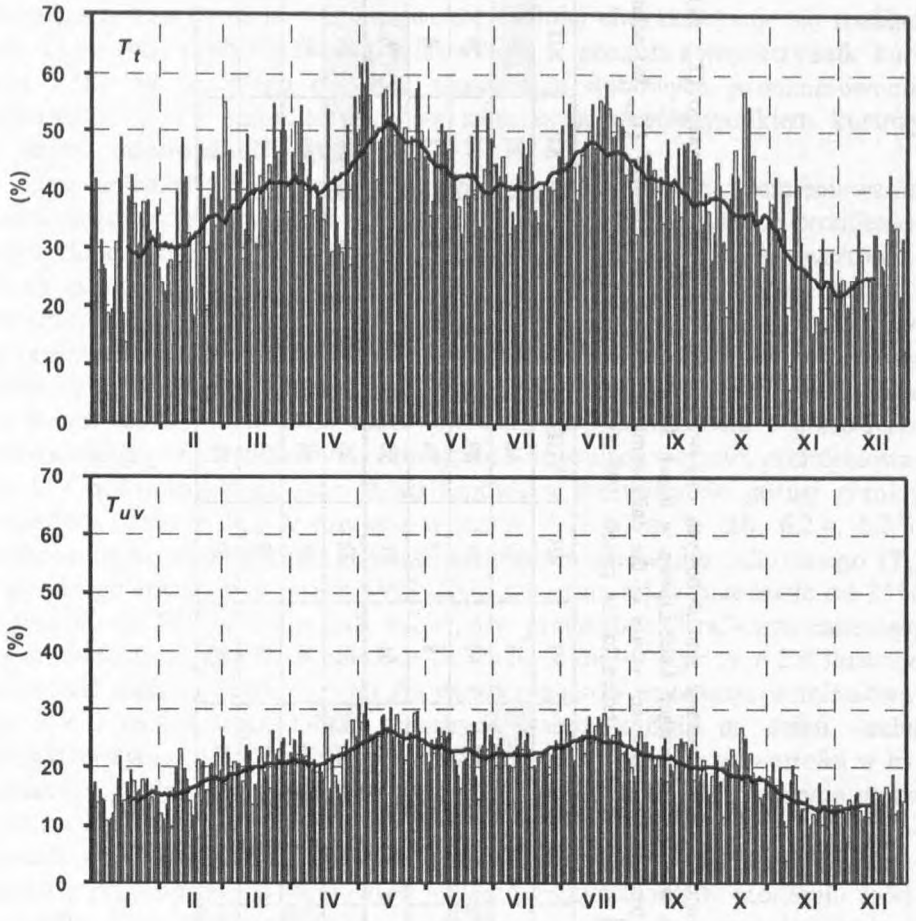
Największą koncentracją wartości wokół średniej charakteryzuje się rozkład sum dobowych promieniowania całkowitego w grudniu (współczynnik kurtozy 1,18). W przebiegu rocznym szereg sum dobowych promieniowania całkowitego i UV charakteryzuje się najniższym współczynnikiem kurtozy w marcu, odpowiednio –0,004 i –0,19.

Uzupełnieniem charakterystyki szeregu sum dobowych promieniowania słonecznego w centrum Łodzi w latach 1997–2001 jest porównanie promieniowania słonecznego dla szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa z wartościami na górnej granicy atmosfery. Analiza ta daje pogląd na ogólne warunki transmisji energii słonecznej w atmosferze. Przeciętnie dobowe sumy całkowitego promieniowania słonecznego rejestrowane przy powierzchni ziemi w centrum Łodzi były ponaddwukrotnie niższe od wartości pozaatmosferycznych (średnie D_{t0} w czerwcu wynosiło 44,11 MJm^{-2}), a ekstynkcja ultrafioletu w atmosferze spowodowała ponadczterokrotne zmniejszenie dobowych wartości promieniowania UV notowanych na stacji Łódź-Lipowa w stosunku do górnej granicy atmosfery (średnie D_{uv0} w czerwcu wynosiło 3,49 MJm^{-2}), tab. 6.2.4, 6.2.5. Dobowe wartości współczynnika transmisji promieniowania całkowitego (T_t) w przebiegu rocznym w latach 1997–2001 zawierają się w przedziale od 25% w grudniu do 50% w maju (tab. 6.2.6), a w przypadku ultrafioletu zmieniają się od 14% w listopadzie i grudniu do 26% w maju. Rycina 6.2.8 ilustruje zmienność roczną dobowych wartości współczynników transmisji promieniowania UV i całkowitego. Obok znacznych wahań z dnia na dzień, cechą charakterystyczną tego przebiegu jest występowanie najniższych wartości w listopadzie i grudniu, w miesiącach o największym stopniu zachmurzenia nieba w roku. Dodatkowym czynnikiem zmniejszającym w tych miesiącach przezroczystość atmosfery dla promieniowania słonecznego, mogła być emisja zanieczyszczeń z przydomowych węglowych systemów grzewczych w otoczeniu śródmiejskiej stacji meteorologicznej Łódź-Lipowa. Przebieg wartości średniej ruchomej współczynnika transmisji promieniowania UV i całkowitego (ryc. 6.2.8) wskazuje na wzrost przezroczystości atmosfery w marcu w stosunku do lutego i kwietnia oraz na charakterystyczne czerwcowo-lipcowe „siodło", bardzo wyraźne na tle najwyższych przeciętnych wartości w maju oraz w sierpniu. Bezwzględnie najwyższą dobową transmisję promieniowania całkowitego (80%) i ultrafioletu (37%) zanotowano w marcu. Wzrost przezroczystości atmosfery w marcu oraz średnia roczna kulminacja współczynnika transmisji promieniowania UV i całkowitego w maju jest rezultatem częstych w ostatniej dekadzie rozpogodzeń na skutek wzrostu frekwencji typów blokadowych cyrkulacji i związanych z nim napływem z sektora południowego mas powietrza o podwyższonej przezroczystości (Kożuchowski (red.) 2000). Obniżenie przezroczystości atmosfery w miesiącach letnich jest wynikiem znamiennej dla ostatniej dekady intensyfikacji cyrkulacji strefowej, zwiększającej frekwencję dni pochmurnych (Kożuchowski 1995; Kożuchowski (red.) 2000; Marsz, Styszyńska 2001).

Tabela 6.2.6. Średnie i ekstremalne wartości współczynnika transmisji sum dobowych całkowitego (T_t, %) i ultrafioletowego (T_{uv}, %) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table 6.2.6. The mean and the extreme of the transmission coefficient values of the daily sums of total (T_t, %) and UV (T_{uv}, %) solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T_t średnie	30	32	40	41	50	43	40	48	42	36	26	25
T_t max	79	75	80	71	72	69	68	69	69	71	72	79
T_t min	7	5	6	5	9	8	7	14	4	5	3	4
Zakres wahań	47	70	74	66	63	61	61	55	65	66	69	76
T_{uv} średnie	15	17	20	21	26	23	22	25	22	19	14	14
T_{uv} max	31	31	37	35	36	36	35	34	33	32	30	29
T_{uv} min	4	3	5	4	7	4	5	3	3	4	3	2
Zakres wahań	27	28	32	31	29	32	30	31	30	29	27	27

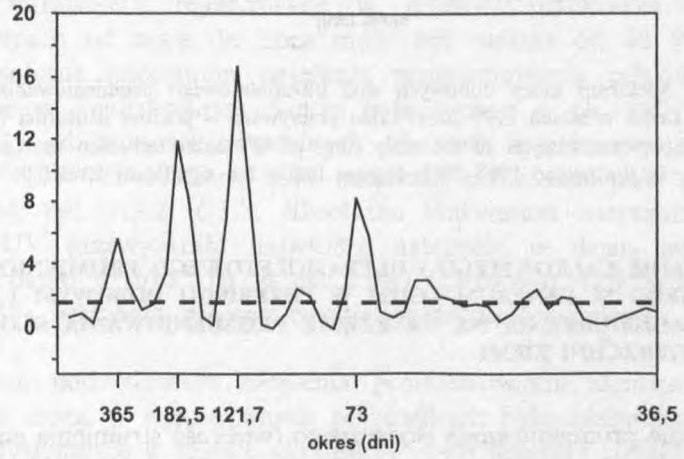


Ryc. 6.2.8. Przebieg roczny współczynnika transmisji sum dobowych całkowitego (T_t) i ultrafioletowego (T_{uv}) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Linia ciągła – średnia ruchoma 31-dniowa

Fig. 6.2.8. Annual course of the transmission coefficient of the daily sums of total (T_t) and UV (T_{uv}) solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. Solid line – 31-day running average

Zagadnienie czasowej zmienności sum energii całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w centrum Łodzi w latach 1997–2001 prezentowane w tym opracowaniu rozszerzono o wyniki analizy zmierzającej do wykrycia periodyczności w szeregach czasowych tych elementów solarnych klimatu. Problem cykliczności w klimatologicznych szeregach czasowych z obszaru Europy i Polski został szerzej omówiony w podrozdziale 5.1.

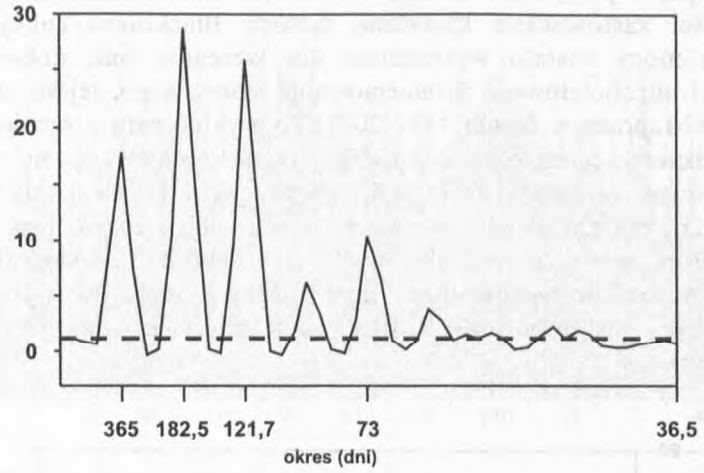
Podobnie jak w przypadku szeregów czasowych usłonecznienia, do wykrycia okresowości zastosowano klasyczną metodę Blackmana-Tukeya (1959). Spektrum mocy zostało wyznaczone dla szeregów sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego, rejestrowanych na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Po wykluczeniu z szeregów czasowych podstawowej okresowości rocznej najsilniej ujawniły się w widmie mocy zarówno promieniowania całkowitego, jak i UV wahania półroczne (182,5 dnia), mające największy udział w wariancji szeregu, przy czym ten pik spektrum w przypadku ultrafioletu jest bardziej wyraźny (ryc. 6.2.9, 6.2.10). Ponadto w widmie mocy analizowanych szeregów wyróżniają się piki spektrum dla wahań 121,7 dnia (ok. 4 miesiące) oraz 73 dni (około 2,5 miesiąca).



Ryc. 6.2.9. Spektrum mocy dobowych sum całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi w latach 1997–2001. Linia przerywana – poziom istotności 0,05

Fig. 6.2.9. Spectrum analysis of the daily sums of total solar radiation time series in Łódź in the period 1997–2001. Dashes line – the significant level 0.05

Silna półroczna cykliczność wykryta w szeregach sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego, a także cykl ok. 2,5-miesięczny mogą mieć związek ze zmiennością opadów i prężności pary wodnej, zdominowaną przez identyczne wahania ujawniające się na obszarze całej Polski (Fortuniak 2000b). Próbę uzasadnienia półrocznych wahań elementów solarnych klimatu przedstawiono szerzej w podrozdziale 5.1.



Ryc. 6.2.10. Spektrum mocy dobowych sum ultrafioletowego promieniowania słonecznego w Łodzi w latach 1997–2001. Linia przerywana – poziom istotności 0,05
Fig. 6.2.10. Spectrum analysis of the daily sums of UV solar radiation time series in Łódź in the period 1997–2001. Dashes line – the significant level 0.05

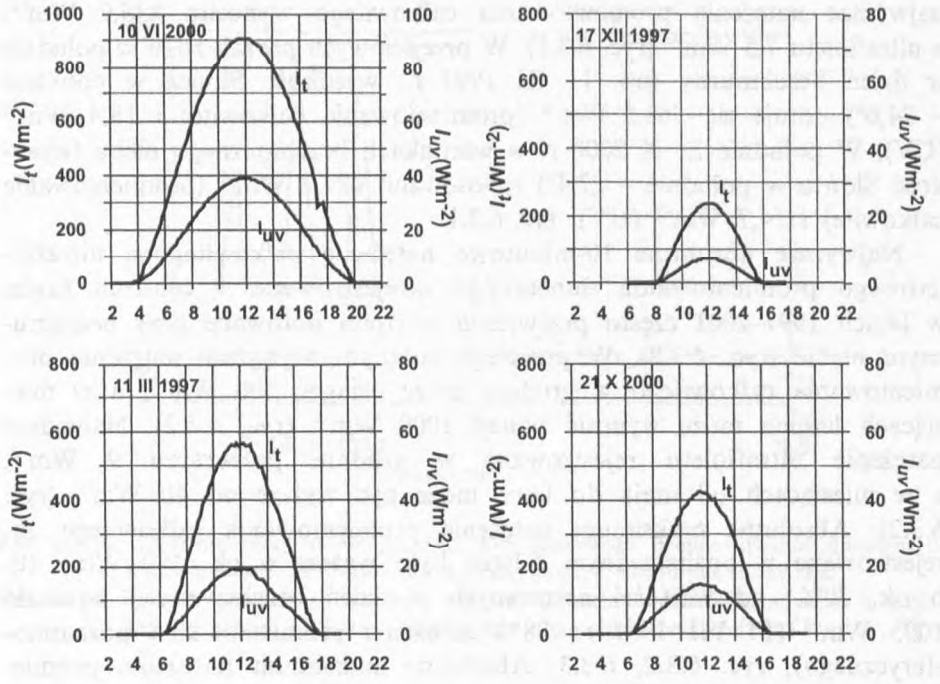
6.3. NATĘŻENIE CAŁKOWITEGO I ULTRAFIOLETOWEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W CENTRUM ŁODZI W PRZEBIEGU DOBOWYM I ROCZNYM. WPŁYW ZACHMURZENIA NA NATĘŻENIE PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO PRZY POWIERZCHNI ZIEMI

Natężenie promieniowania słonecznego (wielkość strumienia energii), czyli ilość energii otrzymywana przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu, jest głównie zdeterminowana wysokością Słońca nad horyzontem, optycznymi właściwościami atmosfery, rodzajem powierzchni czynnej, stopniem zachmurzenia nieba i rodzajami chmur oraz ich pozycją względem tarczy Słońca. Na górnej granicy atmosfery, na szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa ($\varphi = 51°45'N$) najwyższe w roku natężenie całkowitego promieniowania słonecznego i promieniowania ultrafioletowego (UVA + UVB) na powierzchni poziomej wynosi odpowiednio 1241,5 Wm^{-2} i 98,2 Wm^{-2}. Na stacji Łódź-Lipowa najwyższe natężenie promieniowania słonecznego notuje się zgodnie z uwarunkowaniami astronomicznymi w okresie letnim. W letni bezchmurny dzień (np. 10 VI 2000 r., wysokość Słońca w południe – 61,2°) najwyższe 10-minutowe natężenie całkowitego promieniowania słonecznego wynosiło 910 Wm^{-2}, a promieniowania UV 39,2 Wm^{-2}. Zimą w warunkach bezchmurnego nieba (np. 17 XII 1997 r., wysokość Słońca w południe – 14,8°)

najwyższe natężenie promieniowania całkowitego wynosiło 238,9 Wm^{-2}, a ultrafioletu 7,5 Wm^{-2} (ryc. 6.3.1). W przejściowych porach roku w południe w dzień bezchmurny (np. 11 III 1997 r., wysokość Słońca w południe – 34,6°) notuje się 568,5 Wm^{-2} (promieniowanie całkowite) i 19,4 Wm^{-2} (UV). W południe 21 X 2000 r. w warunkach bezchmurnego nieba (wysokość Słońca w południe – 27,4°) zanotowano 424,7 Wm^{-2} (promieniowanie całkowite) i 14,7 Wm^{-2} (UV), ryc. 6.3.1.

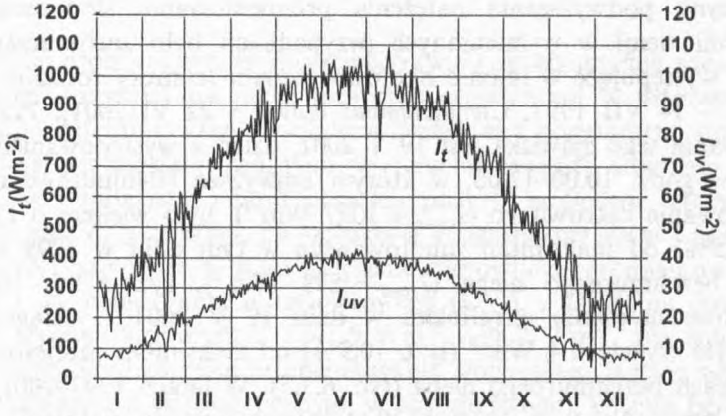
Najwyższe absolutne 10-minutowe natężenie całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego zarejestrowane w centrum Łodzi w latach 1997–2001 często przewyższa wartości notowane przy bezchmurnym niebie (ryc. 6.3.2). W przebiegu rocznym najwyższe natężenie promieniowania całkowitego w grudniu może osiągać 300 Wm^{-2}, a w miesiącach letnich może wynosić ponad 1000 Wm^{-2} (ryc. 6.3.2). Najwyższe natężenie ultrafioletu rejestrowane w grudniu przekracza 9 Wm^{-2}, a w miesiącach od maja do lipca może być wyższe od 40 Wm^{-2} (ryc. 6.3.2). Absolutne maksimum natężenia promieniowania całkowitego zarejestrowane w analizowanym 5-leciu było wyższe o ok. 190 Wm^{-2} (tj. o ok. 20%) od wartości notowanych w dzień bezchmurny i wynosiło 1095 Wm^{-2} (14 VII 1997 r., 88% natężenia promieniowania pozaatmosferycznego), ryc. 6.3.2, 6.3.3. Absolutne maksimum natężenia promieniowania UV przewyższało najwyższe natężenie w dzień bezchmurny w lipcu o około 6 Wm^{-2} (tj. o ok. 15%) i wynosiło 42,9 Wm^{-2} (22 VI 2001 r., 44% natężenia promieniowania pozaatmosferycznego), ryc. 6.3.2, 6.3.4.

Przyczyną podwyższania natężenia promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi w wymienionych przypadkach było zachmurzenie konwekcyjne występujące w rejonie okołosłonecznym (chmury rodzaju *Cumulus congestus* – 14 VII 1997, *Cumulonimbus calvus* – 22 VI 2001). Przykładem występowania tego zjawiska jest 19 V 2001, dzień z występowaniem chmur *Cu med* w godz. 10.00–17.00, w którym najwyższe 10-minutowe natężenie promieniowania całkowitego ($I_{t\max} = 1037$ Wm^{-2}), było większe o 139 Wm^{-2} (tj. o 15,5%) od maksimum zanotowanego w tym dniu w 1999 r. w warunkach bezchmurnego nieba ($I_{t\max} = 898$ Wm^{-2}), ryc. 6.3.5. Najwyższe 10-minutowe natężenie ultrafioletu w dniu 19 V 2001 r. osiągnęło 40,8 Wm^{-2} i było wyższe o 4 Wm^{-2} (tj. o 10,9%) od maksimum zarejestrowanego w warunkach bezchmurnego nieba (ryc. 6.3.5). W latach 1997–2001 zanotowano 40 przypadków, w których 10-minutowe wartości natężenia promieniowania całkowitego były wyższe od 1000 Wm^{-2}. Wystąpiły one 25 razy w czerwcu, 10 razy w lipcu i 5 razy w maju. Najdłuższy czas rejestracji tak wysokich wartości natężenia promieniowania słonecznego wynosił ok. 40 minut i wystąpił w dniu 24 VI 1999 r. w godzinach od 10.40 do 11.30.



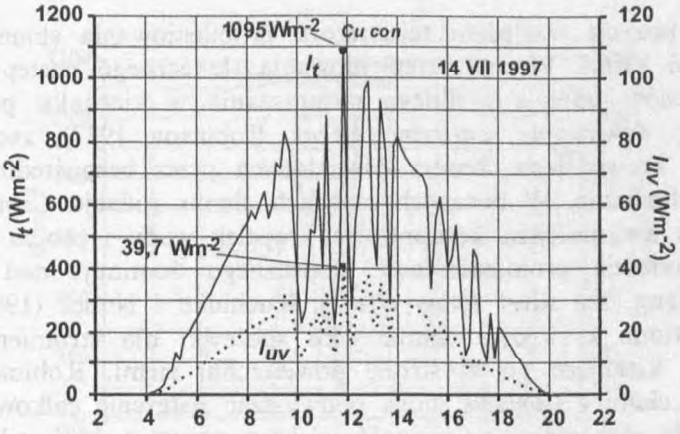
Ryc. 6.3.1. Natężenie całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w wybranych dniach bezchmurnych na stacji Łódź-Lipowa

Fig. 6.3.1. Intensity of total and UV solar radiation in selected clear days at Łódź-Lipowa station



Ryc. 6.3.2. Najwyższe średnie 10-minutowe natężenie całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w przebiegu rocznym (na podstawie danych z lat 1997–2001)

Fig. 6.3.2. The highest 10-minute average intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation at Łódź-Lipowa station in annual course (based on data from the period 1997–2001)



Ryc. 6.3.3. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w dniu z absolutnie najwyższą 10-minutową średnią natężenia promieniowania całkowitego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. *Cu con* – chmura rodzaju *Cumulus congestus* obserwowana w czasie pomiarów

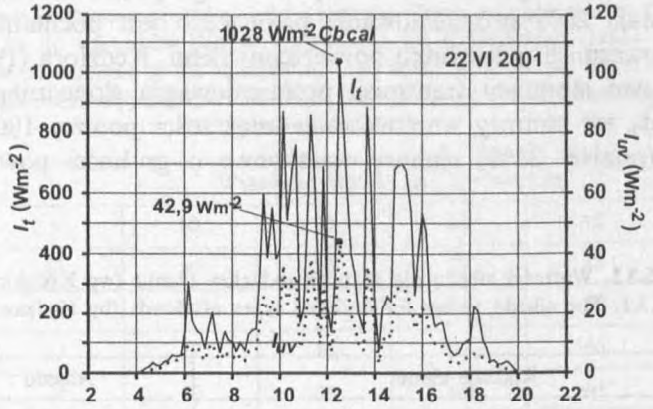
Fig. 6.3.3. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the day with occurrence of the absolute highest 10-minute average intensity of total solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. *Cu con* – *Cumulus congestus* cloud type was observed during measurements

W czasie rejestracji natężenia promieniowania słonecznego, były obserwowane chmury rodzaju *Cu med* (zachmurzenie 2), *Ac pe* (zachmurzenie 3), *Ci fib* (zachmurzenie 1). Natężenie ultrafioletu odpowiadające 40 wartościom promieniowania całkowitego większym od 1000 Wm^{-2} zawierało się w przedziale od 36,1 Wm^{-2} do 42,88 Wm^{-2} . Wszystkie przypadki wartości strumienia energii słonecznej powyżej 1000 Wm^{-2} wystąpiły w warunkach zachmurzenia konwekcyjnego. Wielkość zachmurzenia nieba w większości nie przekraczała 2 stopni w skali 9-stopniowej, najczęściej notowano wystąpienie chmur rodzaju *Cu med* (65% przypadków). Pozostałe obserwowane rodzaje chmur to *Cu con*, *Cb*, *Cu hum*. Szczegółowy wykaz 10-minutowych wartości natężenie promieniowania słonecznego powyżej 1000 Wm^{-2} i odpowiadającym im warunków zachmurzenia przedstawia tab. XV (załącznik).

Zjawisko podwyższania przez chmury wartości natężenia promieniowania słonecznego rejestrowanego przy powierzchni ziemi jest często opisywane w literaturze klimatologicznej. Monteith i Unsworth (1988) podają, że chmury mogą powodować wzrost strumienia energii całkowitego promieniowania słonecznego w stosunku do wartości rejestrowanych w warunkach bezchmurnego nieba przeciętnie od 5 do 15%, a najbardziej efektywny wzrost natężenia promieniowania całkowitego przy powierzchni ziemi następuje przy pokryciu nieba przez chmury w ok. 50%. Wniosek ten dotyczy rozbudowanych chmur konwekcyjnych, nie przesłaniających w pełni tarczy słonecznej i zajmujących

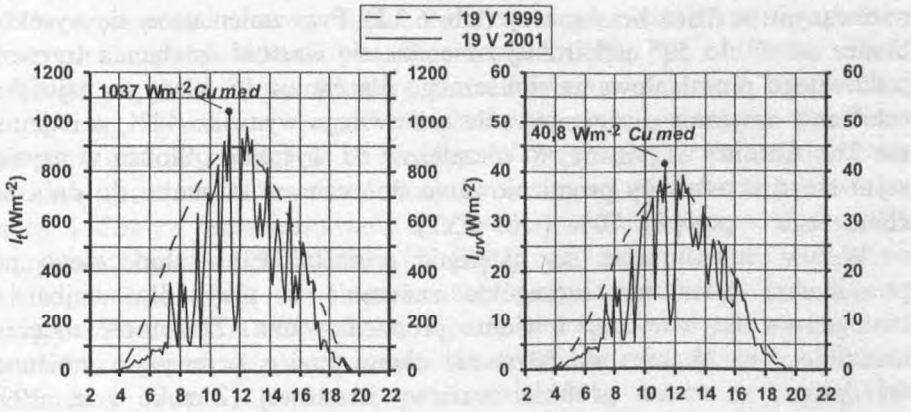
określoną pozycję względem rejestratora promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi. Wzrost promieniowania słonecznego następuje w wyniku procesów odbicia i silnego rozpraszania w kierunku powierzchni ziemi (ang. *downwards scattering effect*, Robinson 1977), zachodzących głównie w krawędziach chmury oświetlonych przez bezpośrednie promieniowanie słoneczne. W bocznych częściach chmur rodzaju *Cumulus* i *Cumulonimbus* jest mniejsza koncentracja kropelek wody i proces rozpraszania oraz odbicia promieniowania słonecznego dominuje nad procesem absorpcji (ang. *the silver lining effect*). Kuchinke i Nunez (1999), określają oświetlone krawędzie chmur jako soczewki dla strumienia energii słonecznej, kierujące go w stronę powierzchni ziemi. Robinson (1977) podaje, że chmury *Cumulus* mogą podwyższać natężenie całkowitego promieniowania słonecznego o wartość większą nawet o 15% od natężenia promieniowania rozproszonego pochodzącego z bezchmurnego nieba. Zjawisko podwyższania wartości promieniowania słonecznego przez chmury jest najbardziej efektywne, gdy wymiar wertykalny chmury jest zbliżony do horyzontalnego, a oprócz geometrii chmury kluczową rolę dla transmisji promieniowania słonecznego odgrywa rodzaj i wielkość elementów składowych chmury i jej optyczna grubość (Monteith, Unsworth 1988; Estupinan, Raman 1996; Kuchinke, Nunez 1999). Badania nad wpływem rozbudowanych chmur rodzaju *Cumulus* na natężenie całkowitego promieniowania słonecznego rejestrowanego przy powierzchni ziemi przeprowadzone w stanie Colorado (USA) przez Segal i Davis (1992) dowodzą podwyższania natężenia promieniowania słonecznego nawet o 250 Wm^{-2} w stosunku do wartości notowanych przy bezchmurnym niebie. Zjawisko tak znacznego podwyższania wartości natężenia promieniowania słonecznego w wyniku odbicia w bocznych częściach chmur konwekcyjnych występowało w czasie okołopołudniowym i trwało zwykle 15–30 min, ale zdarzyły się przypadki, gdy utrzymywało się około 1 godziny (Segal, Davis 1992).

Zjawisko podwyższania wartości promieniowania słonecznego przez chmury pojawiające się tylko w specyficznych warunkach atmosferycznych nie ma tak dużego znaczenia w bilansie radiacyjnym jak zjawisko osłabiania strumienia energii słonecznej. Efektywność procesu ekstynkcji w chmurach zależy od budowy fizycznej chmury, m.in. wielkości elementów składowych, optycznej grubości chmury. Dla chmur o dużej miąższości charakterystyczny jest proces wielokrotnego rozproszenia promieniowania słonecznego (ang. *multiple scattering effect*), wpływający na wzrost absorpcji, a w efekcie na spadek transmisji promieniowania słonecznego. Chmury te cechuje również wysokie albedo (Robinson 1977; Kondratiew i in. 1998). Monteith i Unsworth (1988) podają, że górna część chmur rodzaju *Nimbostratus* i *Cumulonimbus* może odbijać 80–90% energii słonecznej, a *Stratus* o dużej



Ryc. 6.3.4. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w dniu z absolutnie najwyższą 10-minutową średnią natężenia promieniowania UV na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. *Cb cal* – chmura rodzaju *Cumulonimbus calvus* obserwowana w czasie pomiarów

Fig. 6.3.4. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the day with occurrence the absolute highest 10-minute average intensity of UV solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. *Cu cal* – *Cumulus calvus* cloud type was observed during measurements



Ryc. 6.3.5. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w dniu bezchmurnym (19 V 1999) i w dniu z zachmurzeniem konwekcyjnym (19 V 2001) na stacji Łódź-Lipowa

Fig. 6.3.5. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the clear day (19 May 1999) and in the day with convective clouds (19 May 2001) at Łódź-Lipowa station

miąższości może odbijać do 70% bezpośredniego promieniowania słonecznego, pozostałe 20% promieniowania padającego jest pochłaniane i tylko 10% ulega transmisji w kierunku powierzchni ziemi. Kędziora (1995) podaje, że największym stopniem transmisji promieniowania słonecznego (powyżej 80%) cechują się chmury warstwowe o miąższości poniżej 100 m, a najmniejszym (poniżej 25%) chmury warstwowe o grubości powyżej 500 m (tab. 6.3.1).

Tabela 6.3.1. Wartości albedo dla różnych rodzajów chmur (wg Kędziora 1995)
Table 6.3.1. The albedo values for different types of clouds (by Kędziora 1995)

Rodzaje chmur	Albedo
Chmury wysokie	0,5–0,6
Chmury kłębiaste	0,5–0,65
Chmury warstwowe o grubości <100 m	0,13
Chmury warstwowe o grubości >500 m	0,75
Chmury deszczowe grube	0,8–0,9

Kondratiew (1965) przedstawił zależność stopnia osłabiania natężenia całkowitego promieniowania słonecznego od rodzaju chmur (zachmurzenie całkowite) i wysokości Słońca nad horyzontem w porównaniu z wartościami notowanymi w dzień bezchmurny (tab. 6.3.2). Przy zmieniającej się wysokości Słońca od 5° do 50° najbardziej zmieniała się wartość osłabienia transmisji całkowitego promieniowania słonecznego dla chmur *Ci*, kiedy to największe osłabienie natężenia promieniowania całkowitego wynosiło 44%, a najmniejsze 2%. Chmury *St fra*, *Sc*, *St* niezależnie od wysokości Słońca w największym stopniu osłabiały promieniowanie słoneczne w stosunku do dnia bezchmurnego – powyżej 70% (tab. 6.3.2).

Wpływ zachmurzenia na natężenie promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi ma szczególne znaczenie w przypadku najbardziej biologicznie aktywnej części widma promieniowania. Zmienność natężenia ultrafioletu na skutek oddziaływania chmur często przewyższa zmienność wynikającą ze zmian grubości warstwy ozonowej (Ziemke i in. 1998). Chmury, podobnie jak w przypadku całkowitego zakresu widma promieniowania słonecznego, oddziałują na natężenie ultrafioletu, potęgując lub osłabiając jego wartość przy powierzchni ziemi. Mims i Frederick (1994) podają, że przy częściowym zachmurzeniu nieba, gdy tarcza Słońca nie jest przesłonięta, wzrost natężenia promieniowania UV może dochodzić do 25% w stosunku do rejestrowanego przy bezchmurnym niebie.

Tabela 6.3.2. Osłabienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego (w %) w zależności od rodzaju chmur (zachmurzenie całkowite) i wysokości Słońca nad horyzontem ($H_s°$) w stosunku do warunków bezchmurnego nieba wg Kondratiewa (1965)

Table 6.3.2. The attenuation of the intensity of total solar radiation (in %) in dependence of type of clouds (overcast sky) and the Sun height ($H_s°$) in relation to cloudless sky condition by Kondratiew (1965)

Rodzaje chmur	Wysokość Słońca nad horyzontem					
	5	10	20	30	40	50
Ci	44	50	34	22	10	2
Cs	33	39	51	35	20	10
Ac	33	39	46	55	46	38
As	44	50	59	64	63	63
St fra	78	83	80	77	77	76
Sc	89	78	68	71	72	73
St	78	78	80	81	83	84

Badania prowadzone przez Estupinan i Raman (1996) nad wpływem zachmurzenia na dopływ promieniowania UVB wykazały, że chmury rodzaju *Cumulus* zlokalizowane w rejonie okołosłonecznecznym i nieprzesłaniające dopływu promieniowania bezpośredniego mogą powodować wzrost natężenia promieniowania UVB rejestrowanego przy powierzchni ziemi nawet o 27% w stosunku do warunków bezchmurnego nieba. Autorzy podają, że wzrost natężenia ultrafioletu B o ponad 20% był notowany latem w okresie popołudniowym (chmury *Cu*, *Cb* wraz z *Ac*) i nie trwał dłużej niż 10 min, a wzrost wartości do 20% był rejestrowany w przedziale czasowym od kilku minut do 1 godziny. W przypadku przesłonięcia tarczy słonecznej przez rozbudowane chmury konwekcyjne dominował proces ekstynkcji i dopływ promieniowania UVB był redukowany nawet do 99% (Estupinan, Raman 1996). Bais i in. (1993) analizując zależność natężenia promieniowania UVB od stopnia zachmurzenia nieba, prognozuje, że w przypadku pokrycia nieba do 40% przez chmury średni wzrost natężenia ultrafioletu wyniesie 4% w stosunku do natężenia rejestrowanego w dzień bezchmurny. Gdy zachmurzenie przekracza 50%, notowany jest spadek natężenia promieniowania UV, który przy zachmurzeniu całkowitym może wynieść do 80% (Bais i in., 1993). Degünther i Meerkötter (2000) podają, że w zależności od rozmiaru wertykalnego chmury, wysokości Słońca nad horyzontem i odległości rejestratora od chmury mogą zarówno podwyższać natężenie promieniowania UV o ponad 15%, jak i obniżać o 50%. Autorzy przedstawiają w opracowaniu szczegółowy opis mechanizmu oddziaływania

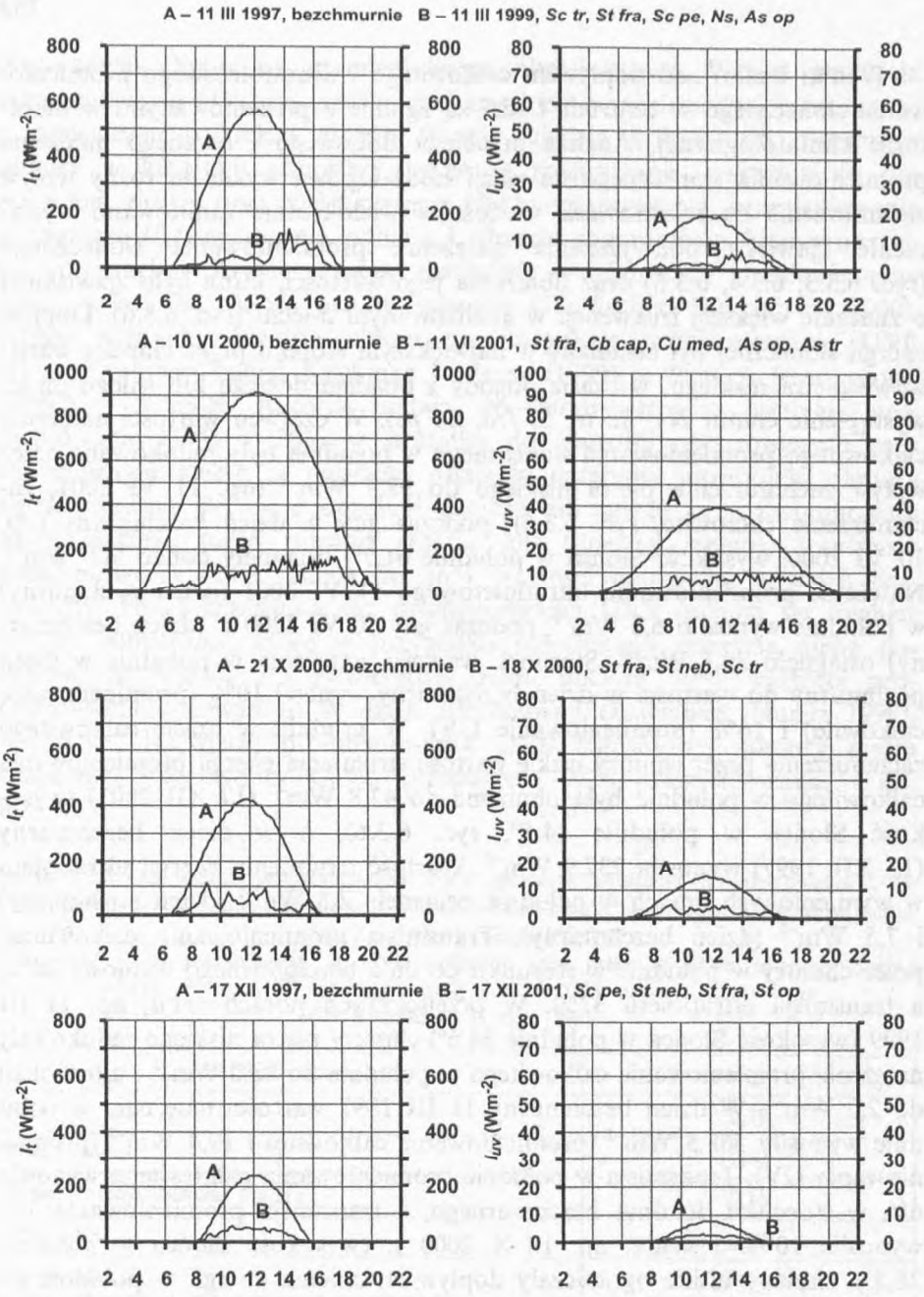
izolowanych chmur na promieniowanie ultrafioletowe. Wzrost natężenia promieniowania UV przy powierzchni ziemi jest wynikiem dwóch procesów, tj. zwiększonego efektu albedo (fotony ulegają odbiciu od elementów chmury w kierunku atmosfery, gdzie są rozpraszane i wracają do powierzchni ziemi) oraz zwiększonego efektu rozpraszania promieniowania w chmurze (fotony ulegają odbiciu i silnemu rozproszeniu kierunkowemu do powierzchni Ziemi). Proces ekstynkcji w chmurach dominuje przy niskiej wysokości Słońca nad horyzontem (Degünther, Meerkötter, 2000). Wpływ różnych rodzajów chmur na ekstynkcję promieniowania UVB był przedmiotem badań Kuchinke i Nunez (1999) w Szwecji (szer. geogr. 57°69'N i 58°83'N. Autorzy podają, że chmury średnio osłabiają promieniowanie UVB w 26% w stosunku do wartości rejestrowanych przy bezchmurnym niebie, a najsilniej osłabiały natężenie ultrafioletu chmury piętra niskiego. W dni z opadami deszczu lub śniegu przy zachmurzeniu piętra niskiego (m.in. *Stratus fractus* lub *Cumulus fractus*) transmisja promieniowania UVB malała do 16% wartości notowanej w dzień bezchmurny. Niską transmisją dla promieniowania UVB cechują się również chmury *Altostratus*, które w przypadku całkowitego pokrycia nieba powodują, że średnio do powierzchni ziemi dociera 39% wartości promieniowania notowanego w dzień bezchmurny (Kuchinke, Nunez 1999), tab. 6.3.3. Najwięcej promieniowania UVB transmitują chmury piętra wysokiego, np. chmura *Cirrus* przepuszcza 97% promieniowania UVB, tab. 6.3.3.

Tabela 6.3.3. Transmisja promieniowania UVB (stosunek natężenia promieniowania UVB w warunkach zachmurzenia do natężenia w dzień bezchmurny) dla wybranych rodzajów chmur (wg Kuchinke i Nunez 1999)

Table 6.3.3. The transmission of UVB radiation (the ratio of UVB intensity during overcast sky to UVB intensity during clear sky) for selected cloud types (by Kuchinke i Nunez 1999)

Rodzaje chmur	Transmisja UVB
Stratus	0,79
Stratocumulus	0,62
Stratus fractus/Cumulus fractus	0,16
Altostratus	0,39
Altocumulus	0,70–0,78
Cirrus	0,97
Cirrostratus	0,85–0,94

Wyniki badań nad dopływem całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w centrum Łodzi są zgodne z prezentowanymi w literaturze klimatologicznej. Analiza przebiegu dobowego i rocznego natężenia promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa wykazała różny wpływ zachmurzenia na rejestrowane wartości – wielokrotnie zanotowano wystąpienie zjawiska podwyższania natężenia promieniowania słonecznego (ryc. 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5) oraz obniżania jego wartości, które było zjawiskiem o znacznie większej frekwencji w analizowanym 5-leciu (ryc. 6.3.6). Dopływ energii słonecznej był osłabiany w największym stopniu przez chmury warstwowe piętra niskiego, w czasie pogody z opadem deszczu lub śniegu (m.in. wystąpienie chmur *Ns*, *Sc tr*, *St fra*, *Sc pe*). W czerwcu wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w południe były redukowane przez wpływ zachmurzenia piętra niskiego do 98,7 Wm^{-2} (np. 11 VI 2001, zachmurzenie całkowite, ryc. 6.3.6), podczas gdy w dzień bezchmurny (np. 10 VI 2000, wysokość Słońca w południe 61,2°) osiągnęły ponad 900 Wm^{-2}. Natężenie promieniowania ultrafioletowego 11 VI 2001 (dzień pochmurny) w południe wynosiło 6,3 Wm^{-2}, podczas gdy 10 VI 2000 r. (dzień bezchmurny) osiągnęło 39,1 Wm^{-2}. Stosunek wartości natężenia w południe w dzień pochmurny do wartości w dzień bezchmurny wynosił 10% (promieniowanie całkowite) i 16% (promieniowanie UV). W grudniu w czasie całkowitego zachmurzenia przez chmury niskie wartość strumienia energii promieniowania całkowitego w południe była obniżona do 47,8 Wm^{-2} (17 XII 2001) (wysokość Słońca w południe 14,8°, ryc. 6.3.6), a w dzień bezchmurny (17 XII 1997) wynosiła 237,9 Wm^{-2}. Wartość strumienia energii ultrafioletu w wymienionych dniach w południe osiągnęła 2,8 Wm^{-2} (dzień pochmurny) i 7,5 Wm^{-2} (dzień bezchmurny). Transmisja promieniowania całkowitego przez chmury w południe w stosunku do dnia bezchmurnego wyniosła 20%, a transmisja ultrafioletu 37%. W przejściowych porach roku, np. 11 III 1999 (wysokość Słońca w południe 34,6°) chmury piętra niskiego redukowały natężenie promieniowania całkowitego w południe do 28,2 Wm^{-2} i ultrafioletu do 2,0 Wm^{-2}. W dzień bezchmurny 11 III 1997 wartości natężenia w południe wynosiły 568,5 Wm^{-2} (promieniowanie całkowite) i 19,4 Wm^{-2} (promieniowanie UV). Transmisja w południe promieniowania całkowitego wynosiła 6% w stosunku do dnia bezchmurnego, a transmisja promieniowania UV wynosiła 10%. Jesienią, np. 18 X 2000 r. (wysokość Słońca w południe 28,5°), chmury niskie ograniczały dopływ strumienia energii w południe do 53,4 Wm^{-2} (promieniowanie całkowite) i 3,2 Wm^{-2} (promieniowanie UV). W dzień bezchmurny, np. 21 X 2000 (wysokość Słońca w południe 27,4°), natężenie promieniowania całkowitego i UV wynosiło odpowiednio 424,7 Wm^{-2} i 14,7 Wm^{-2}. Transmisja promieniowania całkowitego przez chmury



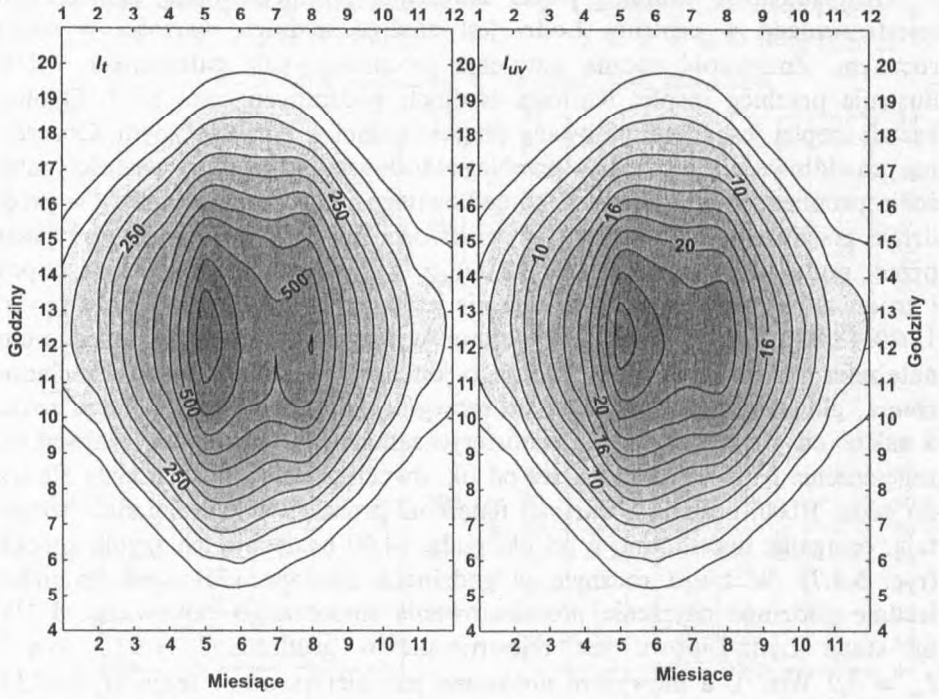
Ryc. 6.3.6. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w wybranych dniach bezchmurnych i pochmurnych (zachmurzenie całkowite) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.3.6. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in selected clear (A) and cloudy (overcast sky, B) days at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

wynosiła 13%, a transmisja promieniowania UV 22%. Porównanie względnych wartości transmisji promieniowania całkowitego i ultrafioletu pozwala sformułować wniosek o większym osłabianiu przez chmury natężenia promieniowania w całkowitym zakresie widma niż natężenia promieniowania UV w stosunku do wartości rejestrowanych w warunkach bezchmurnego nieba. Ta sama konkluzja została przedstawiona przez K. Słomkę (1976, 1979) w opracowaniach dotyczących wpływu zachmurzenia na promieniowanie nadfioletowe w Belsku i Warszawie. Autorka podaje, że średnia transmisja całkowitego promieniowania słonecznego przez chmury w warunkach całkowitego zachmurzenia wynosi 23%, podczas gdy promieniowania UV wynosi 32%, co daje wyniki zbliżone do otrzymanych przez Bielinskiego (35%) i Büttnera (43%) (Słomka K., 1976). Problem wpływu zachmurzenia na dopływ całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego został szerzej omówiony w podrozdziale 6.4.

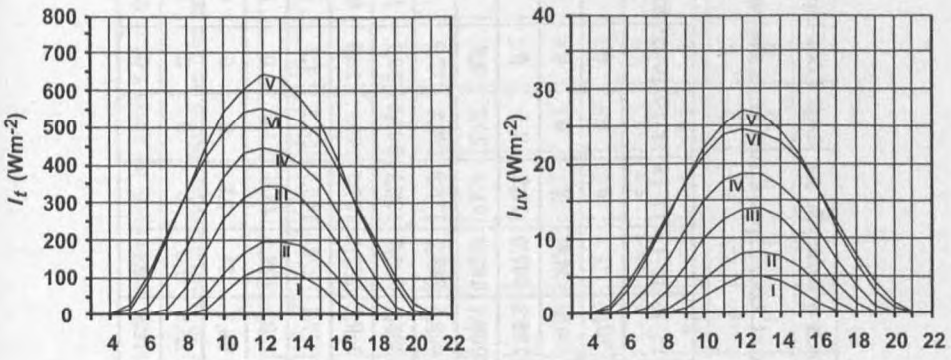
Uzupełnieniem charakterystyki natężenia promieniowania słonecznego rejestrowanego w centrum Łodzi jest analiza średnich wartości w biegu rocznym. Zmienność roczną natężenia promieniowania całkowitego i UV ilustruje przebieg izoplet wartości średnich godzinnych, ryc. 6.3.7. Ogólny kształt izoplet jest zdeterminowany długością dnia w biegu rocznym. Generalną prawidłowością jest, że w przebiegu dobowym najwyższe wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego i UV rejestrowane są w przedziale godzinnym 11.00–13.00. W większości miesięcy maksimum przypada przed południem (godz. 11.00–12.00) z wyjątkiem lutego, marca, lipca i grudnia, kiedy to najwyższe natężenie jest rejestrowane po południu (godz. 12.00–13.00), tab. 6.3.4, 6.3.5. Termin wystąpienia dobowego maksimum natężenia promieniowania słonecznego jest uzależniony od wpływu zachmurzenia, głównie konwekcyjnego, co szczególnie widać w ciepłej porze roku, a także od przezroczystości atmosfery (zamglenia, zapylenia). Największe zagęszczenie izoplet cechuje okres od ok. dwóch godzin po wschodzie Słońca do godz. 10.00, następnie wartości natężenia promieniowania łagodnie wzrastają, osiągając maksimum, a od ok. godz. 14.00 następuje ich szybki spadek (ryc. 6.3.7). W biegu rocznym w godzinach okołopołudniowych najniższe średnie godzinne natężenie promieniowania słonecznego całkowitego i UV na stacji Łódź-Lipowa jest rejestrowane w grudniu (I_t = 93,3 Wm^{-2}, I_{uv} = 3,9 Wm^{-2}), a najwyższe notowane jest nietypowo w maju (I_t = 643,6 Wm^{-2}, I_{uv} = 27,1 Wm^{-2}), podczas gdy zgodnie z uwarunkowaniami astronomicznymi powinno występować w czerwcu (ryc. 6.3.7, 6.3.8, tab. 6.3.4, 6.3.5). W czerwcu i lipcu następuje obniżenie, a w sierpniu wzrost średnich wartości natężenia promieniowania słonecznego, co w przebiegu izoplet uwidacznia się w postaci drugorzędnego rocznego maksimum (ryc. 6.3.7,

6.3.8, tab. 6.3.4, 6.3.5). Ta cecha rocznego przebiegu wartości strumienia energii w Łodzi jest odzwierciedleniem warunków cyrkulacyjnych przejawiających się zwiększoną frekwencją zachodniego przepływu mas powietrza w czerwcu i lipcu, a w konsekwencji wzrostem zachmurzenia w tych miesiącach. Analizując średni przebieg dobowy w poszczególnych miesiącach, można zauważyć szybki przyrost natężenia promieniowania całkowitego i UV w marcu w stosunku do lutego, oraz szybki spadek wartości we wrześniu w stosunku do sierpnia oraz w listopadzie w stosunku do października (ryc. 6.3.8, 6.3.9). Jest to głównie wynikiem uwarunkowań astronomicznych – zmian wysokości Słońca nad horyzontem – a także warunków cyrkulacyjnych. Znaczny spadek natężenia promieniowania słonecznego we wrześniu i listopadzie może być wynikiem rosnącego trendu zachmurzenia w tych miesiącach, charakterystycznego szczególnie dla ostatniej dekady (Kożuchowski (red.), 2000).

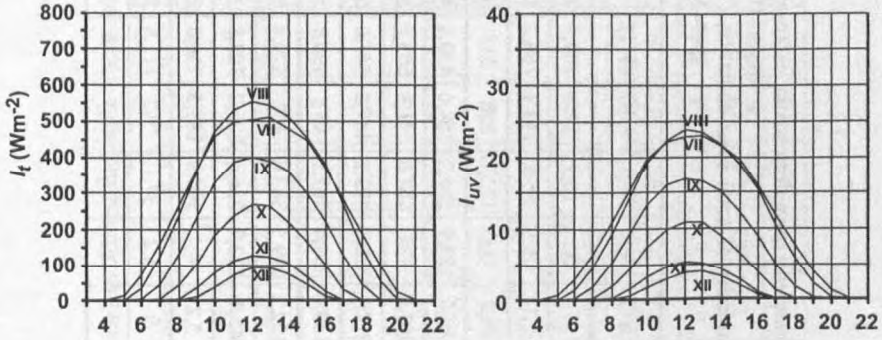


Ryc. 6.3.7. Izoplety średnich godzinnych wartości natężenia całkowitego (I_t, Wm^{-2}) i ultrafioletowego (I_{uv}, Wm^{-2}) promieniowania słonecznego w biegu rocznym na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.3.7. Isopleths of the mean hourly values of intensity of total (I_t, Wm^{-2}) and UV (I_{uv}, Wm^{-2}) solar radiation in annual course at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.3.8. Średni miesięczny przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego w okresie I–VI na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001
Fig. 6.3.8. The monthly average daily course of intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the period I–VI at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.3.9. Średni miesięczny przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego w okresie VII–XII na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001
Fig. 6.3.9. The monthly average daily course of intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the period VII–XII at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Tabela 6.3.4. Średnie miesięczne natężenie promieniowania całkowitego (Wm^{-2}) w przedziałach godzinnych na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table 6.3.4. The mean monthly intensity of total solar radiation (Wm^{-2}) in hourly intervals at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0	0	0	0	0,2	15,3	57,9	104,4	130,9	129,4	108,4	74,2	30,1	3	0	0	0	0
II	0	0	0	0,1	10,2	55,6	113,1	166,3	196,1	196,7	187	149,7	94,8	34,4	2	0	0	0
III	0	0	0,3	16,3	79,9	172,1	258	315	343,7	343,7	319	256,7	185,2	102,6	31,2	1,3	0	0
IV	0	0,6	20,8	89,6	183,9	286,2	368,6	430,1	444,8	435,8	403,9	356,1	268,1	180,9	91,3	22,2	0,3	0
V	0,1	15,3	87,8	201,8	328	447,4	541,8	603,6	643,6	632,6	581,9	513,2	408,6	288,2	176,3	80,8	12,9	0
VI	0,8	30	106,8	212,3	326,9	423,2	487,2	541,6	551,6	537,6	519,7	474,8	385,6	293,3	192,1	103,8	33,1	1,5
VII	0,2	13,9	70,8	159,6	268,4	367,3	457	496,9	500,8	509,5	479,4	446,2	369,2	285,4	187,7	99,1	26,8	0,8
VIII	0	1,3	35,4	122,2	239,5	363,6	470	529,4	554,1	542,1	511,6	451,4	377,2	270	145,7	54,3	4,2	0
IX	0	0	3,5	45,8	133,7	236,6	326,2	383,8	397,5	388,1	361,2	296,8	220,6	128,5	44,6	3,4	0	0
X	0	0	0	5,2	44,1	104,8	181,5	236,6	266,3	264,8	221	161,6	98,1	31	1,8	0	0	0
XI	0	0	0	0	6,2	37,1	79,2	111,8	126,1	123,7	105,1	66,8	23,8	1,3	0	0	0	0
XII	0	0	0	0	0,2	10,7	40,1	70,6	91,2	93,3	75,2	44,1	10,9	0,1	0	0	0	0

Tabela 6.3.5. Średnie miesięczne natężenie promieniowania ultrafioletowego (Wm^{-2}) w przedziałach godzinnych na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table 6.3.5. The mean monthly intensity of UV solar radiation (Wm^{-2}) in hourly intervals at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Godz. / M-ce	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	17–18	18–19	19–20	20–21
I	0	0	0	0	0	0,7	2,2	3,8	4,9	5	4,2	2,9	1,3	0,2	0	0	0	0
II	0	0	0	0	0,5	2,2	4,5	6,7	8	8,2	7,7	6,1	3,7	1,4	0,1	0	0	0
III	0	0	0	0,7	3,1	6,4	10	12,6	13,9	14	12,8	10,2	7,1	3,9	1,3	0,1	0	0
IV	0	0	0,9	3,4	7	11,3	15	17,8	18,6	18,5	17	14,6	10,8	7,1	3,6	1	0	0
V	0	0,7	3,3	7,4	12,5	17,7	22	25,1	27,1	26,7	24,5	21,1	16,4	11,3	6,7	3	0,7	0
VI	0,1	1,3	4,1	8,2	13,1	17,5	20,9	23,7	24,4	24	22,9	20,5	16,4	12,1	7,7	4,1	1,4	0,1
VII	0	0,7	2,9	6,4	11	15,6	19,8	22,1	22,7	23	21,6	19,6	15,9	11,8	7,6	3,9	1,2	0,1
VIII	0	0,1	1,5	4,7	9,3	14,5	19,3	22,2	23,7	23,4	21,8	18,9	15,3	10,5	5,8	2,2	0,3	0
IX	0	0	0,2	1,9	5,3	9,5	13,4	16	16,9	16,6	15,2	12,2	8,8	5	1,8	0,2	0	0
X	0	0	0	0,3	1,9	4,4	7,4	9,8	10,9	10,8	9	6,5	3,8	1,3	0,1	0	0	0
XI	0	0	0	0	0,3	1,6	3,2	4,6	5,3	5,1	4,3	2,7	1	0,1	0	0	0	0
XII	0	0	0	0	0	0,5	1,8	3	3,8	3,9	3,2	1,9	0,6	0	0	0	0	0

6.4. ZWIĄZEK ULTRAFIOLETU Z CAŁKOWITYM PROMIENIOWANIEM SŁONECZNYM. ROLA ZACHMURZENIA W KSZTAŁTOWANIU UDZIAŁU PROCENTOWEGO ULTRAFIOLETU W PROMIENIOWANIU CAŁKOWITYM

Promieniowanie ultrafioletowe w zakresie 290–400 nm (UVA + UVB) na górnej granicy atmosfery stanowi 7,915% całkowitego promieniowania słonecznego (Thekaekara 1971). W wyniku procesów ekstynkcji zachodzących w atmosferze udział ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym rejestrowany przy powierzchni ziemi na stacjach europejskich w warunkach bezchmurnego nieba zawiera się w przedziale 4–5% (Błażejczyk 2002; Błażejczyk, Baranowski 2003; Feister, Grasnick 1992; Foyo-Moreno i in. 1998; Martinez-Lozano i in. 1999, Podstawczyńska, Fortuniak 1998; Zavodska, Reichrt 1985). Do analizy związku promieniowania całkowitego i UV wykorzystano dobowe sumy energii promieniowania rejestrowane w centrum Łodzi w latach 1997–2001. Związek sum dobowych ultrafioletu i promieniowania całkowitego wykazuje silną zależność liniową (współczynnik korelacji 0,99). Średnio 98% zmienności promieniowania UV w roku można wyjaśnić zmiennością promieniowania w całym zakresie widma. Błędy standardowe estymacji sum dobowych ultrafioletu na podstawie sum dobowych promieniowania całkowitego zmieniają się od 3% dla maja, czerwca, lipca do 17% dla grudnia (tab. 6.4.1). Współczynniki równania regresji wskazują, że średni roczny udział procentowy promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym wynosi ok. 4% (tab. 6.4.1, ryc. 6.4.1). Podobne rezultaty w badaniach nad związkiem promieniowania całkowitego i UV otrzymali inni autorzy, m.in. Martinez-Lozano i in. (1994, 1999), Al-Aruri (1990), Khogali i Al-Bar (1992), Zavodska i Reichrt (1985). Analiza współczynników regresji sum dobowych wyznaczonych dla poszczególnych miesięcy wykazała ich zmienność roczną. Najniższe wartości współczynników regresji cechują miesiące zimowe, a największe są charakterystyczne dla lipca. Zmienność współczynników regresji jest uwarunkowana zmianą w roku relacji ilościowych ultrafioletu w stosunku do promieniowania całkowitego, wynikających z wpływu wysokości Słońca nad horyzontem (H_s), przezroczystości atmosfery, zachmurzenia (tab. 6.4.1, ryc. 6.4.2).

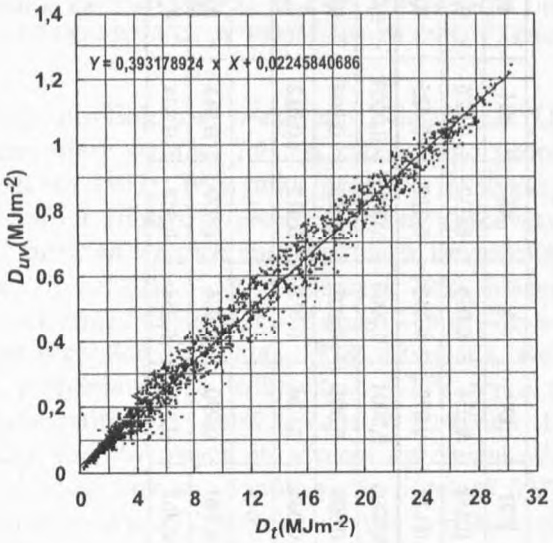
W celu analizy wpływu zmian kąta padania promieni słonecznych, a z nim masy optycznej atmosfery na udział procentowy promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym wybrano 10-minutowe średnie natężenie promieniowania słonecznego (I_{uv} i I_t, Wm^{-2}) rejestrowane w warunkach bezchmurnego nieba. W celu zminimalizowania błędu pomiarowego udział procentowy promieniowania UV w całkowitym ($R_{uv/t}$) obliczono dla przypadków, gdy natężenie promieniowania całkowitego przekraczało 10 Wm^{-2} i było rejestrowane przy wysokości Słońca powyżej 5° (1261 przypadków).

Tabela 6.4.1. Współczynniki równania regresji liniowej ($y = a + bx$) i ich charakterystyki statystyczne dla sum dobowych ultrafioletowego (zmienna zależna) i całkowitego promieniowania słonecznego (zmienna niezależna) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table 6.4.1. The coefficients of linear regression equation ($y = a + bx$) and the statistical characteristics for the daily sums of UV (dependent variable) and total solar radiation (independent variable) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
b	0,026	0,030	0,032	0,034	0,034	0,035	0,036	0,034	0,034	0,034	0,032	0,026	0,039
a	0,029	0,045	0,069	0,092	0,132	0,140	0,128	0,125	0,077	0,042	0,025	0,025	0,022
*$Sig\ b$	0,0008	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0005	0,0004	0,0005	0,0006	0,0009	0,0001
*$Sig\ a$	0,002	0,004	0,005	0,006	0,008	0,007	0,006	0,009	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002
**Sig_e	0,015	0,023	0,031	0,031	0,032	0,030	0,028	0,034	0,024	0,018	0,012	0,012	0,04
**Sig_e (%)	11	11	8	5	3	3	3	4	4	7	10	17	5
R	0,898	0,967	0,977	0,989	0,991	0,993	0,993	0,980	0,990	0,984	0,979	0,913	0,991
R^2	0,807	0,934	0,955	0,978	0,981	0,985	0,985	0,961	0,979	0,968	0,958	0,834	0,982

* Błąd estymacji współczynników regresji.
** Błąd standardowy estymacji modelu regresji liniowej.
R – współczynnik korelacji.
R^2 – współczynnik determinacji.
* Error of estimation of correlation coefficient.
** Standard error of estimation of linear regression model.
R – correlation coefficient.
R^2 – determination coefficient.



Ryc. 6.4.1. Zależność sum dobowych ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.4.1. Relationship between the daily sums of UV and total solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Analiza wartości $R_{uv/t}$ w poszczególnych przedziałach wysokości Słońca wykazała, iż najwyższej wysokości Słońca (H_s = 50,1–61,7°) odpowiada najwyższa średnia wartość $R_{uv/t}$, 4,0% oraz najmniejszy zakres wahań $R_{uv/t}$, tj. od 3,6 do 4,3%. Podobne wartości $R_{uv/t}$ notuje się w przedziale H_s = 40,1–50° (tab. 6.4.2). Najniższe średnie wartości $R_{uv/t}$, 3,3%, notuje się w przedziale H_s = 10,1–20°. Nieco wyższy udział ultrafioletu, 3,5%, jest charakterystyczny dla najniższej wysokości Słońca, tj. 5–10°. W tym przedziale H_s jest obserwowana największa zmienność udziału procentowego ultrafioletu, od 1,5 do 4,9%, tab. 6.4.2, ryc. 6.4.3. Wraz ze wzrostem wysokości Słońca zakres wahań $R_{uv/t}$ zmniejsza się od 3,4% przy najniższym położeniu Słońca do 0,7% przy najwyższym H_s. Jest to wynik zmniejszającej się masy optycznej atmosfery i osłabienia procesów ekstynkcji promieniowania słonecznego w atmosferze. Zależność procentowego udziału ultrafioletu (y) od wysokości Słońca nad horyzontem (x) można opisać następującym wielomianem drugiego stopnia:

$$y = 3{,}266993779 - 0{,}001209904027\ x + 0{,}0003096937128\ x^2.$$

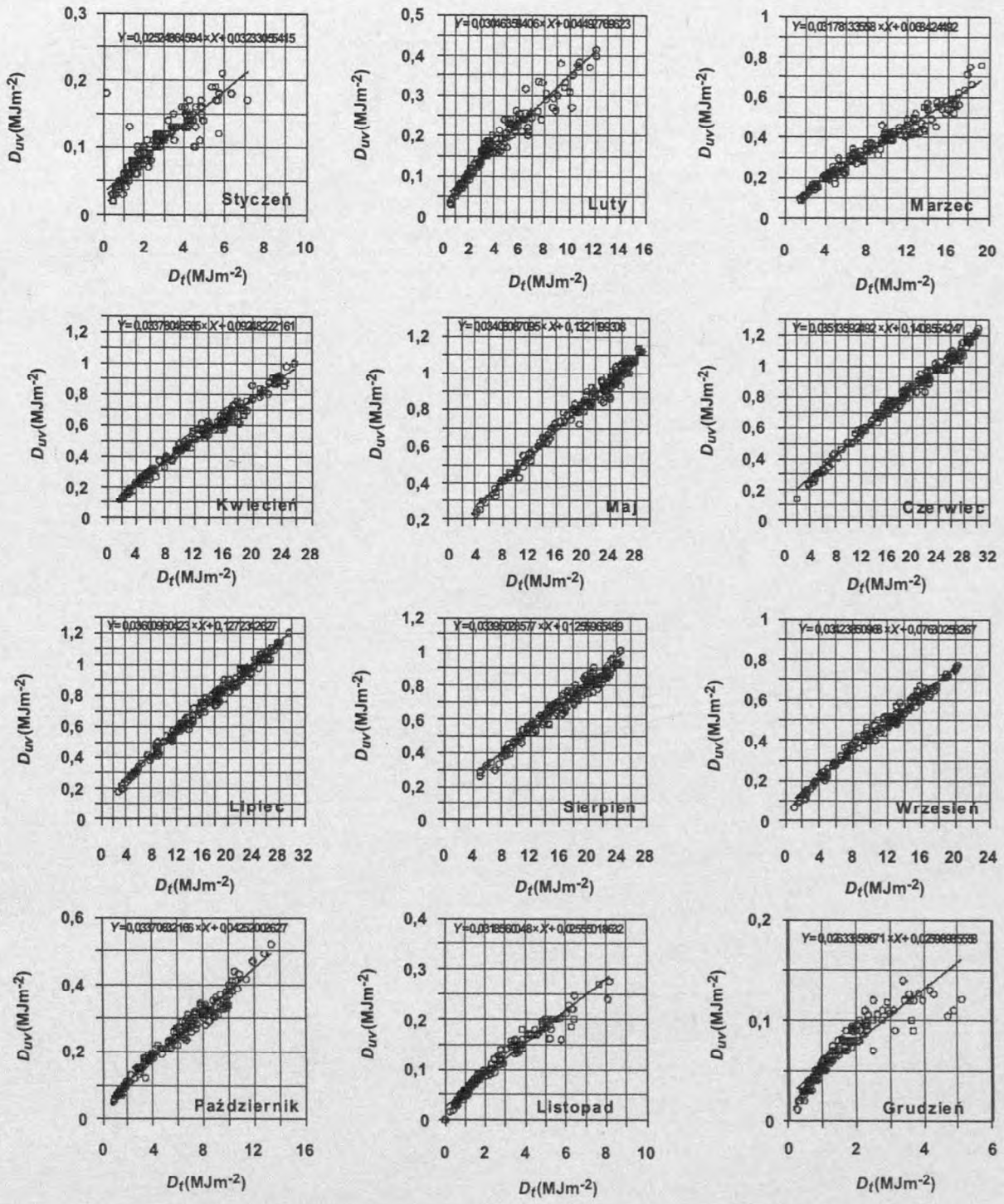
Siła zależności nie jest duża, tylko 32% zmienności udziału ultrafioletu można wyjaśnić zmianami kąta padania promieni słonecznych. Podobny wniosek dotyczący wpływu masy optycznej atmosfery na wartości udziału ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym przedstawił Blumthaler i in. (1985), określając zależność jako słabą w przypadku udziału promieniowania UVA. Natomiast promieniowanie erytemalne UVB wykazywało silną zależność od kąta padania promieni słonecznych. Na intensywność procesów rozpraszania i absorpcji promieniowania słonecznego w warunkach bezchmurnego nieba obok wysokości Słońca wpływ wywiera stan atmosfery (zawartość pary wodnej, zanieczyszczenie powietrza, m.in. przez pyły, SO_2). Pyły i SO_2 zawarte w powietrzu są silnym reduktorem natężenia promieniowania ultrafioletowego, szczególnie przy niskim kącie padania promieni słonecznych. W stosunku do całkowitego promieniowania słonecznego ich oddziaływanie nie jest tak silne jak w przypadku promieniowania UV (Elhadidy i in. 1990). Większe znaczenie dla całkowitego promieniowania słonecznego ma para wodna, która silne absorbuje promieniowanie słoneczne w zakresie bliskiej podczerwieni, czego rezultatem może być relatywne podwyższenie udziału promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym (Elhadidy i in. 1990, Martinez-Lozano i in. 1999). Opisywane tu dość znaczne wahania wartości procentowego udziału ultrafioletu przy niskim kącie padania promieni słonecznych (H_s poniżej 20°) rejestrowane w centrum Łodzi można wyjaśnić zmiennym stanem atmosfery – zmianami wilgotności i stężenia zanieczyszczeń powietrza.

Tabela 6.4.2. Udział natężenia promieniowania UV w natężeniu promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) w warunkach bezchmurnego nieba w przedziałach wysokości Słońca (H_s) i masy optycznej atmosfery (m) w Łodzi w latach 1997–2001

Table 6.4.2. The ratio of UV intensity to total solar radiation intensity ($R_{uv/t}$, %) during cloudless sky in the intervals of the Sun height (H_s) and the optical air masses (m) in Łódź in the period 1997–2001

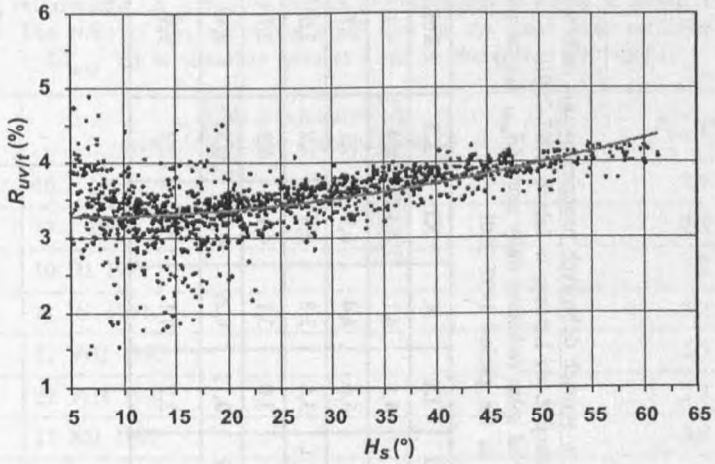
H_s	m	$R_{uv/t}$ średnie	$R_{uv/t}$ min	$R_{uv/t}$ max	Liczba danych
5,0°–10,0°	8,8–5,1	3,5	1,5	4,9	164
10,1°–15,0°	5,0–3,5	3,3	1,8	4,5	214
15,1°–20,0°	3,5–2,7	3,3	1,9	4,3	202
20,1°–30,0°	2,7–2,0	3,4	2,2	4,1	257
30,1°–40,0°	1,9–1,5	3,7	3,1	4,0	215
40,1°–50,0°	1,5–1,3	3,9	3,5	4,2	141
50,1°–61,7°	1,3–1,1	4,0	3,6	4,3	68

W dalszej analizie związku promieniowania UV z promieniowaniem całkowitym oceniono zmiany udziału procentowego sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego w biegu rocznym z uwzględnieniem dni pochmurnych. W biegu rocznym średni dobowy udział ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym cechuje się dużą zmiennością z dnia na dzień, podobnie jak dobowe sumy energii promieniowania słonecznego (ryc. 6.4.4). Największe wahania wartości udziału ultrafioletu z dnia na dzień występują w miesiącach od listopada do lutego, na które przypada największy w roku stopień zachmurzenia nieba (tab. 6.4.3, ryc. 6.4.4). Wartości współczynnika zmienności w tym okresie przekraczały 10%. Podobnie duże amplitudy i wysokie wartości procentowego udziału promieniowania UV w całkowitym, pojawiające się w miesiącach z największym zachmurzeniem, były rejestrowane w Poczdamie (Niemcy, Feister, Grasnick 1992) i Walencji (Hiszpania; Martinez-Lozano i in. 1999). Najmniejsza zmienność z dnia na dzień procentowego udziału ultrafioletu w centrum Łodzi cechowała sierpień i maj, kiedy to współczynnik zmienności wynosił odpowiednio 2,8 i 2,9%. Największy zakres wahań udziału sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego wystąpił w grudniu (4,9%), a najmniejszy w sierpniu (1,9%). Najwyższa średnia wartość udziału sumy dobowej promieniowania UV w sumie dobowej promieniowania całkowitego wyniosła 5,7% (8 listopada), a najniższa 3% (23 grudnia). Najwyższa absolutna wartość udziału ultrafioletu wystąpiła w dniu 22 VI 1999, 7,4%. W tym dniu zarejestrowano całkowite zachmurzenie nieba przez chmury niskie (*St fra, Ns*). Najniższa absolutna wartość udziału promieniowania UV została zanotowana w dniu bezchmurnym tj. 6 I 1997 r., 2,1% (ryc. 6.4.4). Wartości udziału sum dobowych promieniowania UV w sumach dobowych promieniowania całkowitego w dniach bezchmurnych (średnie zachmurzenie ogólne 0) były niższe od średnich dla danego miesiąca i zmieniały się od 2,1% w styczniu do 4,1% w czerwcu (ryc. 6.4.4, tab. 6.4.4). Przedstawione wartości udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym dla stacji Łódź-Lipowa są zbieżne z wynikami prezentowanymi przez Feister i Grasnick (1992) dla Poczdamu (52°22′N, 13°5′E). W Poczdamie przeciętne wartości udziału promieniowania UVA + UVB w promieniowaniu całkowitym wynoszą w dni bezchmurne 3–4%, a w dni pochmurne 5–6%. Foyo-Moreno i in. (1998) przedstawił relacje ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego w południowo-wschodniej Hiszpanii (Granada; 37°18′N, 3°58′W). W Granadzie udział promieniowania UV zmieniał się wraz ze wzrostem zachmurzenia przeciętnie od 3 do 5%.



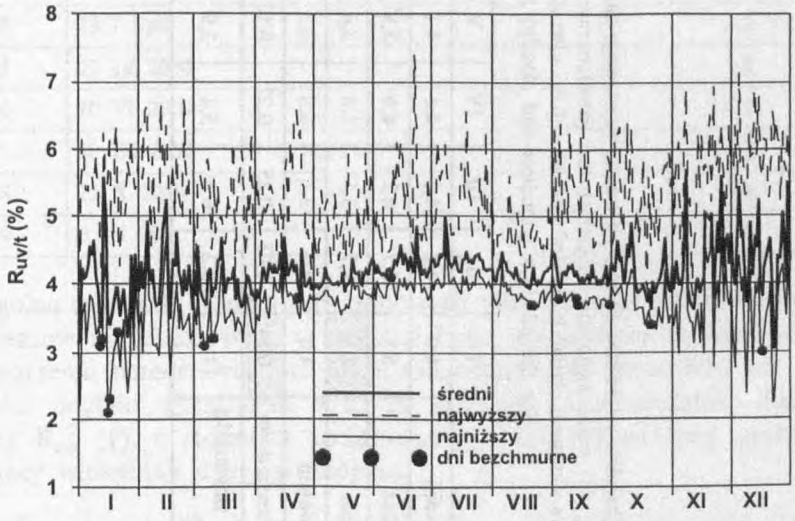
Ryc. 6.4.2. Zależność sum dobowych ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych miesiącach na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.4.2. Relationship between the daily sums of UV and total solar radiation in particular months at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.4.3. Zależność udziału procentowego natężenia promieniowania UV w natężeniu promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) od wysokości Słońca (H_s) w warunkach bezchmurnego nieba na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.4.3. Relationship between the ratio of UV to total intensity of solar radiation ($R_{uv/t}$, %) and the Sun height on cloudless weather conditions at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001



Ryc. 6.4.4. Średni, najniższy i najwyższy udział procentowy sum dobowych promieniowania UV w sumach dobowych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) w biegu rocznym na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Fig. 6.4.4. The mean, the lowest and the highest ratio of UV to total daily sums of solar radiation ($R_{uv/t}$, %) in annual course at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Tabela 6.4.3. Charakterystyki statystyczne udziału procentowego sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) obliczonego dla wszystkich dni (bezchmurnych i pochmurnych) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table 6.4.3. The statistical characteristics of the ratio of the ultraviolet daily sums to the total solar radiation daily sums ($R_{uv/t}$, %) calculated for the all days (cloudless and cloudy) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
$R_{uv/t}$ średni	4,0	4,2	4,0	4,1	4,1	4,3	4,4	4,2	4,1	4,1	4,4	4,4	4,2
$R_{uv/t}$ max	6,3	6,7	6,2	6,6	5,9	7,4	6,5	5,6	6,6	6,4	6,9	7,1	5,7
$R_{uv/t}$ min	2,1	2,7	3,1	3,3	3,6	3,8	3,9	3,7	3,6	3,3	2,8	2,2	3,0
Zakres wahań	4,2	4,0	3,1	3,3	2,3	3,6	2,6	1,9	3,0	3,1	4,1	4,9	2,7
Odchylenie standardowe	0,54	0,43	0,25	0,22	0,12	0,16	0,15	0,12	0,13	0,29	0,53	0,54	0,40
Współczynnik zmienności (%)	13,5	10,2	6,2	5,4	2,9	3,7	3,4	2,8	3,2	7,1	12,0	12,3	9,5

Tabela 6.4.4. Udział procentowy sumy dobowej promieniowania UV w sumie dobowej promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) w dniach bezchmurnych w Łodzi w latach 1997–2001
Table 6.4.4. The ratio of the ultraviolet daily sum to the total solar radiation daily sum ($R_{uv/t}$, %) in cloudless days in Łódź in the period 1997–2001

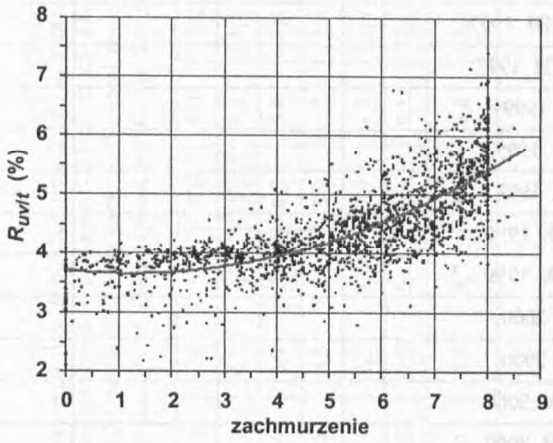
Lp.	Dni bezchmurne (średnie dobowe zachmurzenie 0)	$R_{uv/t}$ (%)
1	16 I 1997	2,1
2	17 I 1997	2,3
3	10 III 1997	3,2
4	11 III 1997	3,2
5	21 VIII 1997	3,7
6	22 VIII 1997	3,7
7	17 XII 1997	3,0
8	21 I 1999	3,3
9	19 V 1999	3,9
10	4 IX 1999	3,8
11	13 IX 1999	3,8
12	14 IX 1999	3,7
13	12 I 2000	3,1
14	13 I 2000	3,2
15	23 IV 2000	3,8
16	10 VI 2000	4,1
17	30 IX 2000	3,7
18	21 X 2000	3,4
19	6 III 2001	3,1

Ogólną zależność udziału sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego w centrum Łodzi od średniej dobowej wartości zachmurzenia przedstawia ryc. 6.4.5. Generalną prawidłowością jest wzrost wartości udziału ultrafioletu wraz ze wzrostem zachmurzenia. Zależność między $R_{uv/t}$ (y), a stopniem zachmurzenia nieba (x) najlepiej opisuje następujący wielomian drugiego stopnia:

$$y = 3{,}711610483 - 0{,}09067429117\ x + 0{,}03783339063\ x^2.$$

Średnio 57% zmienności udziału sum dobowych promieniowania UV w sumach dobowych promieniowania całkowitego można wyjaśnić zmianami

stopnia zachmurzenia nieba. Badania wielu autorów nad oddziaływaniem chmur na natężenie promieniowania słonecznego w różnych zakresach widma dowodzą, iż zdolność transmisyjna chmur dla promieniowania UV jest większa niż dla promieniowania w całkowitym przedziale widma, czego rezultatem okazuje się relatywny wzrost udziału ultrafioletu w natężeniu promieniowania całkowitego (Ambach i in. 1991; Blumthaler i in. 1985; Blumthaler i in.1994; Bordewijk i in. 1995; Degünther, Meerkötter 2000; Elhadidy i in. 1990; Estupinan, Raman 1996; Khogali, Al-Bar 1992; Zavodska, Reichrt 1985; Martinez-Lozano, Casanovas 1994; Martinez-Lozano i in. 1999; Foyo-Moreno i in. 1998; Słomka K. 1976, 1978, 1979; Spinhirne, Green 1978).



Ryc. 6.4.5. Zależność udziału procentowego sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) od średniego dobowego zachmurzenia na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

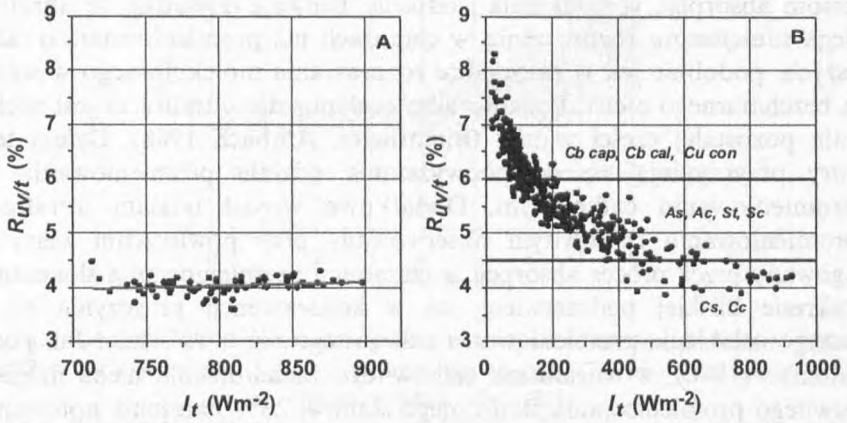
Fig. 6.4.5. Relationship between the ratio of UV to total daily sums of solar radiation ($R_{uv/t}$, %) and the daily average cloudiness at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Zróżnicowany wpływ atmosfery i zachmurzenia na promieniowanie słoneczne w poszczególnych zakresach widma wynika głównie z prawa rozpraszania molekularnego. Generalnie udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym (suma promieniowania bezpośredniego i rozproszonego) w przypadku ultrafioletu jest większy niż w przypadku promieniowania słonecznego w całkowitym zakresie widma. Badania porównawcze natężenia rozproszonego promieniowania UVB i całkowitego promieniowania słonecznego w warunkach bezchmurnego nieba przeprowadziła w południowo-wschodniej Anglii Webb (1991). Autorka podaje, że promieniowanie rozproszone w paśmie UVB stanowi 70–100% całkowitego natężenia promieniowania UVB, podczas gdy promieniowanie rozproszone w całkowitym

zakresie widma stanowi tylko 20% całkowitego natężenia w tym zakresie fal. Blumthaler i in. (1994) twierdzą, że w Szwajcarii w warunkach bezchmurnego nieba, dla wysokości Słońca nad horyzontem 50°, promieniowanie rozproszone UVB stanowi 39%, UVA 34%, a promieniowanie słoneczne w całkowitym zakresie widma stanowi tylko 11% sumy natężenia promieniowania rozproszonego i bezpośredniego. Odwrotne relacje charakteryzują promieniowanie UV i całkowite w przypadku promieniowania bezpośredniego. Udział promieniowania bezpośredniego w sumie natężenia promieniowania bezpośredniego i rozproszonego jest większy dla promieniowania w całkowitym zakresie widma niż dla ultrafioletu (Blumthaler i in. 1994).

Chmury determinują proporcję między dwoma komponentami strumienia energii słonecznej dochodzącej do powierzchni ziemi – promieniowaniem bezpośrednim i rozproszonym. Promieniowanie słoneczne w chmurach, które stanowią niejednorodny ośrodek pod względem wielkości cząstek rozpraszających (kropelki wody, molekuły gazowe, aerozole, kryształki lodu), podlega procesom absorpcji, rozpraszania i odbicia. Badania dowodzą, że ultrafiolet podlega silniejszemu rozproszeniu w chmurach niż promieniowanie o falach dłuższych, podobnie jak w przypadku rozpraszania molekularnego w warunkach bezchmurnego nieba. Ponadto albedo chmur dla ultrafioletu jest większe niż dla pozostałej części widma (Blumthaler, Ambach 1988). Dzięki temu chmury przyczyniają się do podwyższania udziału promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym. Dodatkowo wzrost udziału ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym obserwowany przy powierzchni ziemi jest potęgowany przez proces absorpcji w chmurach promieniowania słonecznego w zakresie bliskiej podczerwieni, co w konsekwencji przyczynia się do większego osłabienia promieniowania całkowitego niż ultrafioletu. Jak podaje K. Słomka (1976), w warunkach całkowitego zachmurzenia nieba natężenie całkowitego promieniowania słonecznego stanowi 23% natężenia notowanego w dzień bezchmurny, podczas gdy natężenie ultrafioletu w tych samych warunkach zawiera się w przedziale 32–43% wartości notowanych przy bezchmurnym niebie. Ilustracją wpływu zachmurzenia na wartości udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym w centrum Łodzi w latach 1997–2001 jest ryc. 6.4.6, prezentujący zależność $R_{uv/t}$ od natężenia całkowitego promieniowania słonecznego. Zależność ta została wyznaczona dla wartości natężenia promieniowania słonecznego rejestrowanego przy wysokości Słońca nad horyzontem równej lub większej od 50°, w warunkach bezchmurnego nieba oraz w warunkach całkowitego zachmurzenia. W czasie pogody bezchmurnej średnia wartość $R_{uv/t}$ wynosiła 4,0% (najniższa $R_{uv/t} = 3{,}6\%$, najwyższa $R_{uv/t} = 4{,}5\%$), a wzrostowi natężenia promieniowania całkowitego odpowiadał niewielki wzrost udziału procentowego ultrafioletu (ryc. 6.4.6a). W warunkach całkowitego zachmurzenia wraz ze wzrostem

natężenia promieniowania całkowitego obserwowany był spadek udziału procentowego promieniowania UV. Średnia wartość $R_{uv/t}$ przy całkowitym zachmurzeniu wynosiła 5,7%, a wartości ekstremalne – 3,9 i 8,3% (ryc. 6.4.6b). Najwyższe wartości $R_{uv/t}$ zanotowano w czasie wystąpienia chmur o niskiej transmisyjności dla promieniowania słonecznego wynikającej ze znacznej miąższości chmur i wielkości ich elementów składowych, np. *Cumulus congestus*, *Cumulonimbus*. Najniższe wartości $R_{uv/t}$ w warunkach całkowitego zachmurzenia nieba zanotowano w czasie wystąpienia chmur piętra wysokiego (*Cs*, *Cc*) charakteryzujących się dużą przepuszczalnością dla promieniowania słonecznego (ryc. 6.4.6b). Opisane zależności między udziałem promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym a natężeniem promieniowania całkowitego na stacji Łódź-Lipowa potwierdzają opisywane w literaturze zjawisko większej przezroczystości chmur dla ultrafioletu niż dla promieniowania o falach dłuższych, które jest w chmurach silnej pochłaniane (głównie w zakresie bliskiej podczerwieni) od promieniowania UV.

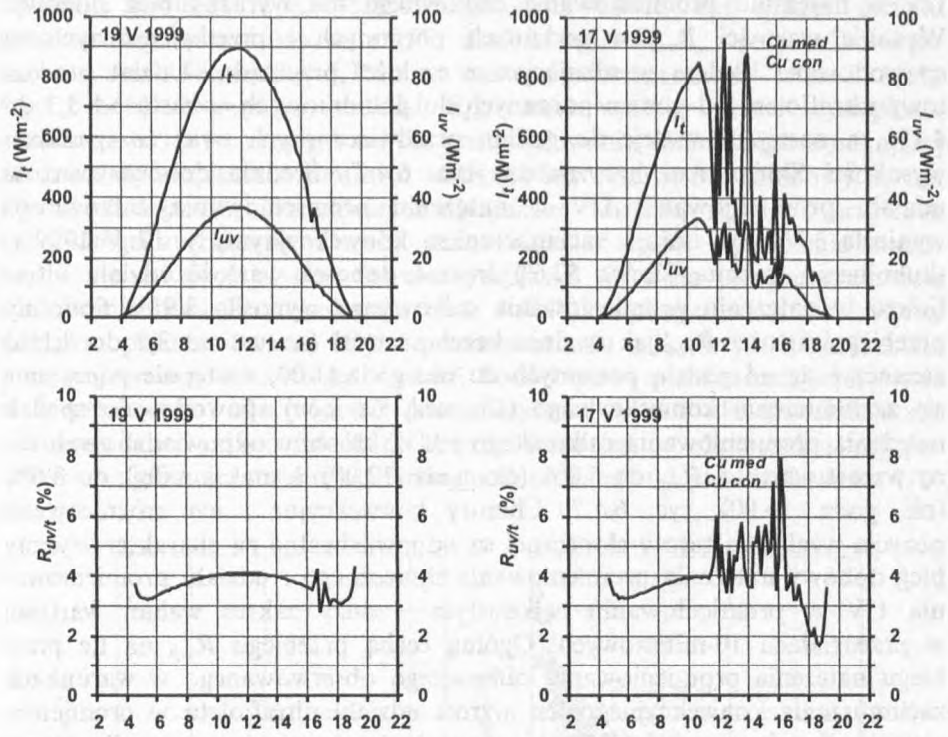


Ryc. 6.4.6. Udział procentowy ultrafioletu w natężeniu całkowitego promieniowania słonecznego ($R_{uv/t}$, %) jako funkcja natężenia całkowitego promieniowania słonecznego (I_t, Wm^{-2}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 w warunkach: A – bezchmurnie, $H_s \geqslant 50°$, B – zachmurzenie całkowite, $H_s \geqslant 50°$

Fig. 6.4.6. The ratio $R_{uv/t}$ (%) as a function of intensity of total solar radiation (I_t, Wm^{-2}) in various atmospheric condition: A – cloudless sky, sun elevation $\geqslant 50°$, B – overcast sky, sun elevation $\geqslant 50°$

Opisywane zależności między udziałem promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym a wysokością Słońca nad horyzontem i zachmurzeniem ujawniają się w przebiegu dobowym wartości $R_{uv/t}$ na tle natężenia promieniowania słonecznego (ryc. 6.4.7–6.4.9). W dniu bezchmurnym, tj. 19 V 1999 r. (kulminacja dzienna Słońca 58,1°) udział procentowy promieniowania

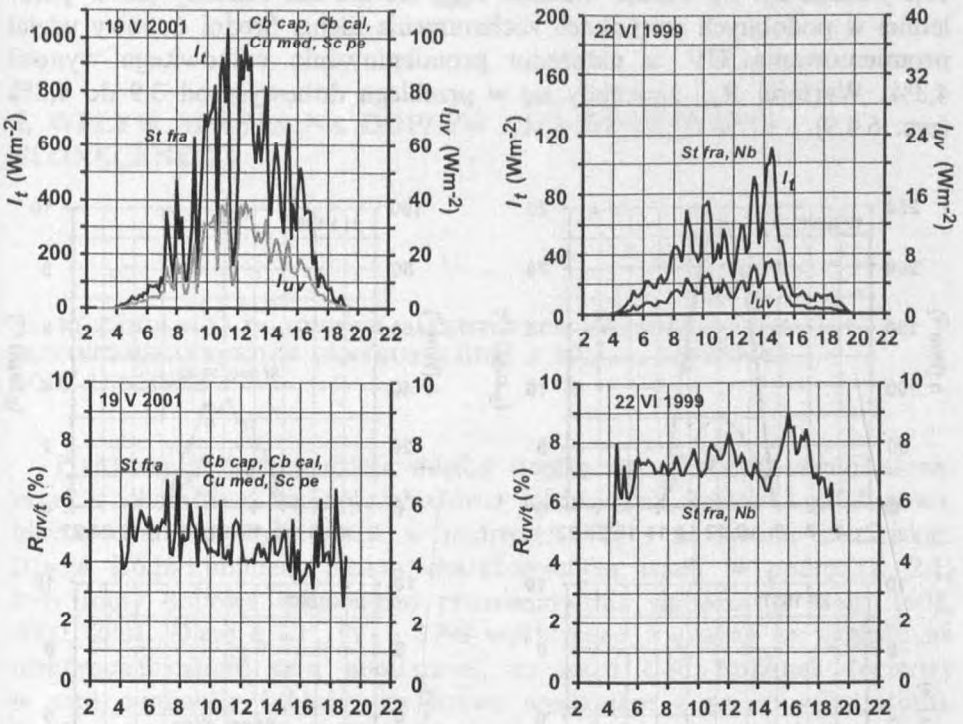
UV w natężeniu promieniowania całkowitego ma wyraźny bieg dobowy. Wysokie wartości $R_{uv/t}$ w godzinach porannych i przedwieczornych są spowodowane błędem wynikającym z czułości przyrządu. Udział procentowy ultrafioletu od godzin porannych do południowych wzrasta od 3,3 do 4,1%, a następnie maleje do godzin przedwieczornych wraz ze spadkiem wysokości Słońca nad horyzontem (ryc. 6.4.7). Średnia dobowa wartość udziału promieniowania UV w natężeniu promieniowania całkowitego wyniosła 3,7%. W dniu z zachmurzeniem konwekcyjnym, tj. 17 V 1999 r. (kulminacja dzienna Słońca 57,6°) średnia dobowa wartość udziału ultrafioletu w natężeniu promieniowania całkowitego wynosiła 3,9%. Podobny przebieg wartości $R_{uv/t}$ jak w dniu bezchmurnym (wzrost od 3,2 do 4,1%) zaznaczył się od godzin porannych do ok. godz.11.00, następnie pojawienie się zachmurzenia konwekcyjnego (*Cu med, Cu con*) spowodowało spadek natężenia promieniowania całkowitego i UV, któremu odpowiadał gwałtowny wzrost wartości $R_{uv/t}$ do 6,0% (ok. godz. 12.00), a maksymalnie do 8,0% (ok. godz. 16.00), ryc. 6.4.7. Chmury konwekcyjne i ich zróżnicowana pozycja względem tarczy słonecznej są odpowiedzialne za charakterystyczny bieg dobowy natężenia promieniowania słonecznego i udziału promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym – duży zakres wahań wartości w przedziałach 10-minutowych. Ogólną cechą przebiegu $R_{uv/t}$ na tle przebiegu natężenia promieniowania całkowitego obserwowanego w warunkach zachmurzenia konwekcyjnego jest wzrost udziału ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym wraz ze spadkiem natężenia promieniowania całkowitego w czasie przesłonięcia tarczy słonecznej przez chmury. Odwrotna tendencja, tj. spadek wartości $R_{uv/t}$ przy wzroście natężenia promieniowania całkowitego, jest obserwowana w czasie, gdy chmury nie przesłaniają dopływu promieniowania bezpośredniego do rejestratora (ryc. 6.4.7). Tendencje dobowego biegu natężenia promieniowania słonecznego i udziału ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym w dniu z zachmurzeniem konwekcyjnym (17 V 1999 r.) znajdują wyjaśnienie w opisywanej teorii wpływu atmosfery i zachmurzenia na promieniowanie słoneczne w różnych przedziałach widma, według której natężenie ultrafioletu jest w mniejszym stopniu osłabiane przez chmury niż promieniowanie w zakresie fal dłuższych. Wpływ zachmurzenia podwyższającego udział ultrafioletu w natężeniu promieniowania całkowitego jest widoczny w biegu dobowym wartości $R_{uv/t}$ w dniu zachmurzeniem niskim warstwowym i konwekcyjnym, tj. 19 V 2001 r., oraz w dniu z całkowitym zachmurzeniem nieba przez chmury niskie (*St fra, Nb*), tj. 22 VI 1999 r. (kulminacja dzienna Słońca 61,7°, ryc. 6.4.8). Na dzień 22 czerwca przypada najwyższy w latach 1997–2001 udział sumy dobowej promieniowania UV w sumie dobowej promieniowania całkowitego, 7,4%. W analizowanych dniach średni procentowy udział ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym przewyższał wartości notowane



Ryc. 6.4.7. Przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego oraz udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym ($R_{uv/t}$) w dniu bezchmurnym (19 V 1999 r.) i w dniu z zachmurzeniem konwekcyjnym (17 V 1999 r.)
Fig. 6.4.7. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV solar radiation (I_{uv}) and the ratio UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) in the clear day (19 May 1999) and in the day with convective clouds (17 May 1999)

przy bezchmurnym niebie i wynosił 4,6% (19 V 2001 r.) i 7,4% (22 VI 1999 r.). W dniu 22 VI 1999 r. były obserwowane chmury deszczowe o słabej transmisji dla promieniowania słonecznego, relatywnie bardziej osłabiające natężenie promieniowania całkowitego niż UV, czego wynikiem był wysoki procentowy udział ultrafioletu.

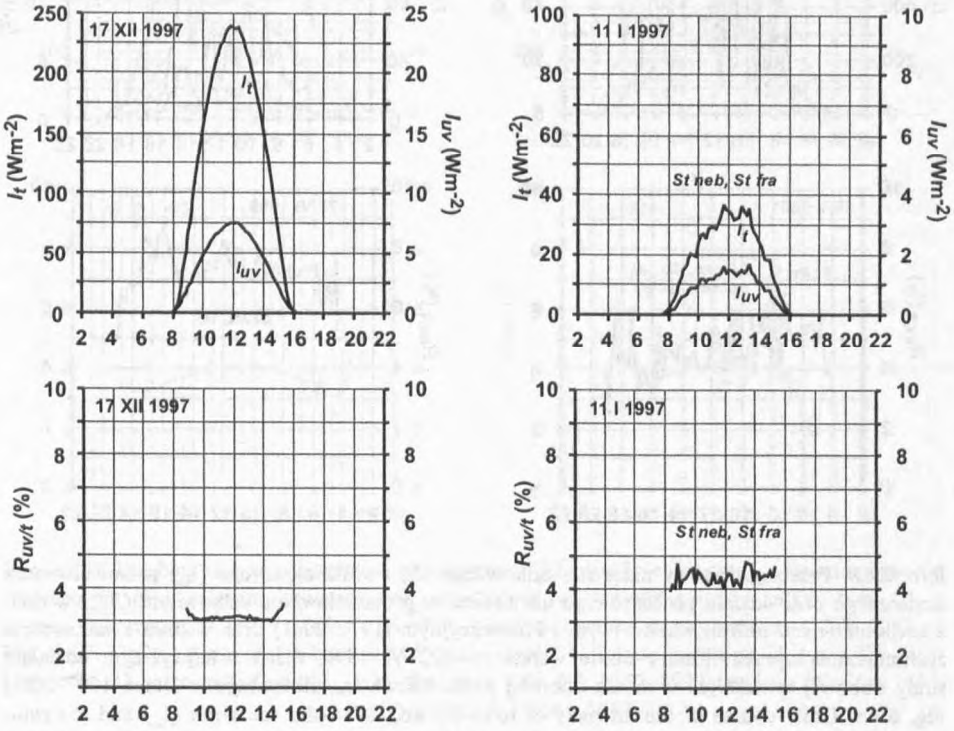
Większa transmisja promieniowania słonecznego cechowała chmury w dniu 19 V 2001 r., kiedy to notowano wyższe natężenie promieniowania całkowitego i UV oraz niższe wartości $R_{uv/t}$ niż w dniu 22 VI 1999 r. (ryc. 6.4.8). Generalną prawidłowością w przebiegu dobowym udziału procentowego ultrafioletu w analizowanych dniach był wzrost wartości $R_{uv/t}$ odpowiadający spadkowi transmisji promieniowania słonecznego przez chmury.



Ryc. 6.4.8. Przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego oraz udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym ($R_{uv/t}$) w dniu z zachmurzeniem niskim warstwowym i konwekcyjnym (19 V 2001) oraz w dniu z całkowitym zachmurzeniem przez chmury niskie warstwowe (22 VI 1999, dzień z najwyższym udziałem sumy dobowej ultrafioletu w sumie dobowej promieniowania całkowitego w latach 1997–2001)
Fig. 6.4.8. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV solar radiation (I_{uv}) and the ratio UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) in the day with low stratified and convective clouds (19 May 2001) and in the day with overcast sky (low stratified cloud types, 22 June 1999 – the highest ratio UV to total daily sums of solar radiation in the period 1997–2001)

W pogodnym dniu zimą, tj. 17 XII 1997 r. (kulminacja dzienna Słońca 14,9°) przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego i UV jest typowy dla krótkiego dnia i niskiego kąta padania promieni słonecznych – wartości cechuje szybki wzrost i szybki spadek. Udział procentowy ultrafioletu cechuje się bardziej wyrównanym przebiegiem w stosunku do bezchmurnego dnia latem, zmieniając się od 3,0% w godzinach porannych do 3,2% w południe (ryc. 6.4.9). Średni dobowy udział ultrafioletu wynosił 3,1%. W dniu zimowym z całkowitym zachmurzeniem przez chmury niskie warstwowe (*St fra, St neb*), tj. 11 I 1997 r. (kulminacja dzienna Słońca

16,5°) zaznaczył się wzrost wartości $R_{uv/t}$, ale nie tak znaczny jak w porze letniej w podobnych warunkach zachmurzenia nieba. Średni dobowy udział promieniowania UV w natężeniu promieniowania całkowitego wynosił 4,3%. Wartości $R_{uv/t}$ zmieniały się w przebiegu dobowym od 3,9 do 4,8% (ryc. 6.4.9).



Ryc. 6.4.9. Przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego oraz udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym ($R_{uv/t}$) zimą w dniu bezchmurnym (17 XII 1997) oraz w dniu z całkowitym zachmurzeniem przez chmury niskie warstwowe (11 I 1997)

Fig. 6.4.9. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV solar radiation (I_{uv}) and the ratio UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) in winter: in the clear day (17 December 1997) and in the day with overcast sky (low stratified cloud types, 11 January 1997)

7. WPŁYW MIASTA NA DOPŁYW PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

7.1. RÓŻNICE SUM DOBOWYCH CAŁKOWITEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO MIĘDZY CENTRUM ŁODZI A STACJĄ ZAMIEJSKĄ ŁÓDŹ-LUBLINEK

Podstawą obliczenia różnic między dopływem całkowitej energii słonecznej w obszarze o zwartej zabudowie śródmiejskiej (stacja Łódź-Lipowa, bliższa charakterystyka stacji w podrozdz. 2.2) i na terenie zamiejskim (stacja Łódź-Lublinek, bliższa charakterystyka stacji w podrozdz. 2.1) były sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego z lat 1998, 2000, 2001. Dane z lat 1997 i 1999 wykluczono z analizy ze względu na niehomogeniczność serii pomiarowej ze stacji Łódź-Lublinek (przerwy w serii pomiarów i błędy pomiarowe wynikające z awarii rejestratora). Stacja Łodź-Lublinek (S-W peryferia miasta), reprezentująca obszar zamiejski jest oddalona o ok. 7 km od centrum i ok. 2 km od zwartej zabudowy miejskiej. Pomiary całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lublinek były prowadzone na wieży aktynometrycznej zlokalizowanej w ogródku meteorologicznym IMGW, na wysokości 5 m n.p.g. Przyrządy aktynometryczne na stacji Łódź-Lipowa były zlokalizowane na dachu budynku Instytutu Nauk o Ziemi UŁ 18 m n.p.g. Mierniki promieniowania całkowitego z omawianych stacji (pyranometry CM11 Kipp & Zonen) zostały wycechowane w Zespole Aktynometrii Ośrodka Meteorologii IMGW wg tego samego wzorca, co zapewniło porównywalność wyników (podrozdz. 2.2.).

Roczne sumy całkowitego promieniowania słonecznego w centrum Łodzi są przeciętnie o 5% (około 180 MJm^{-2}) niższe od sum rocznych rejestrowanych na stacji Łódź-Lublinek (tab. 7.1.1). Średnie roczne różnice sum dobowych promieniowania całkowitego wynoszą 7% na niekorzyść stacji Lipowa. Największymi różnicami w dopływie promieniowania słonecznego w przebiegu rocznym charakteryzuje się sezon zimowy (XII–II). Sumy dobowe całkowitego promieniowania słonecznego w tym okresie są przeciętnie niższe w centrum miasta o ponad 10% od rejestrowanych na terenie zamiejskim (tab. 7.1.2). Na dzień 31 stycznia przypada naj-

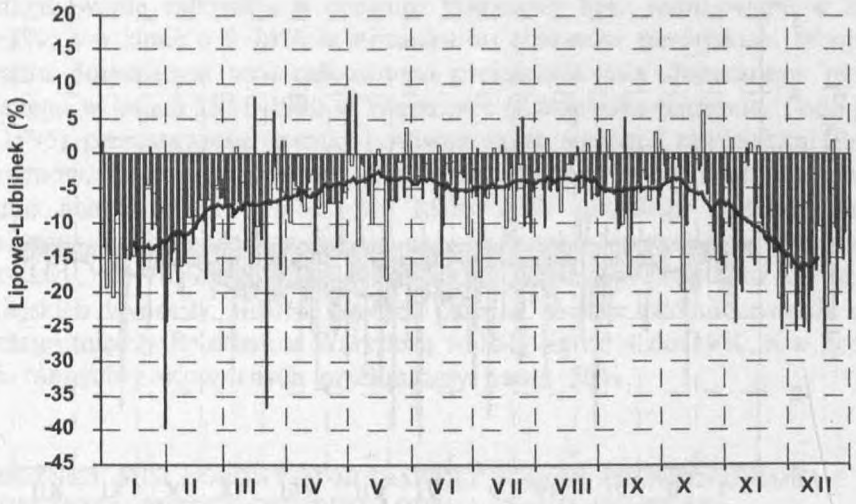
większa przeciętna różnica w dziennych sumach energii promieniowania słonecznego między centrum a obszarem zamiejskim, –40%. W okresie XI–III mogą wystąpić dni, w których suma energii promieniowania słonecznego w centrum Łodzi jest niższa o ponad 25% od wartości rejestrowanych na stacji Łódź-Lublinek (ryc. 7.1.1, tab. 7.1.2). W pozostałych miesiącach wartości przeciętnych różnic w poszczególnych dniach nie przekraczają 20%, ryc. 7.1.1. Najniższymi przeciętnymi różnicami sum dobowych promieniowania całkowitego między obszarem miejskim i zamiejskim w przebiegu rocznym wyróżnia się maj, 3% na niekorzyść centrum miasta. Duży kąt padania promieni słonecznych oraz frekwencja mas powietrza o zwiększonej przezroczystości w tym miesiącu przyczyniają się do zmniejszenia różnic w dopływie energii słonecznej.

Tabela 7.1.1. Sumy roczne całkowitego promieniowania słonecznego i ich różnice między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000 i 2001
Table 7.1.1. The annual sums of total solar radiation and the differences between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in years: 1998, 2000, 2001

	1998	2000	2001	1998–2001
Lublinek (MJm^{-2})	3922,8	3938,3	3664,3	3841,8
Lipowa (MJm^{-2})	3613,8	3815,1	3558,4	3662,5
Lipowa-Lublinek (MJm^{-2})	–309,0	–123,2	–105,9	–179,4
Lipowa-Lublinek (%)	–7,9	–3,1	–2,9	–4,6

W okresie lata (VI–VIII), a także we wrześniu i w październiku średnie miesięczne różnice sum dobowych promieniowania całkowitego nie przekraczają 5% (tab. 7.1.2). Wartości bezwzględne średnich różnic dobowych zmieniają się od –0,22 MJm^{-2} w grudniu do 0,79 MJm^{-2} w czerwcu. Centrum Łodzi otrzymuje przeciętnie o 0,5 MJm^{-2} dziennie mniej energii słonecznej od terenów zamiejskich (ryc. 7.1.2, tab. 7.1.3).

Zaprezentowane tu wyniki znajdują potwierdzenie w literaturze dotyczącej stosunków radiacyjnych na obszarach zurbanizowanych (podrozdz. 1.3). Podobne wnioski przedstawili Błażejczyk (2002) oraz Błażejczyk i Baranowski (2003) dla Warszawy, porównując wartości promieniowania całkowitego z centrum aglomeracji z wartościami rejestrowanymi na stacji Borowa Góra, położonej 35 km w kierunku NE od miasta, w latach 2000–2002.



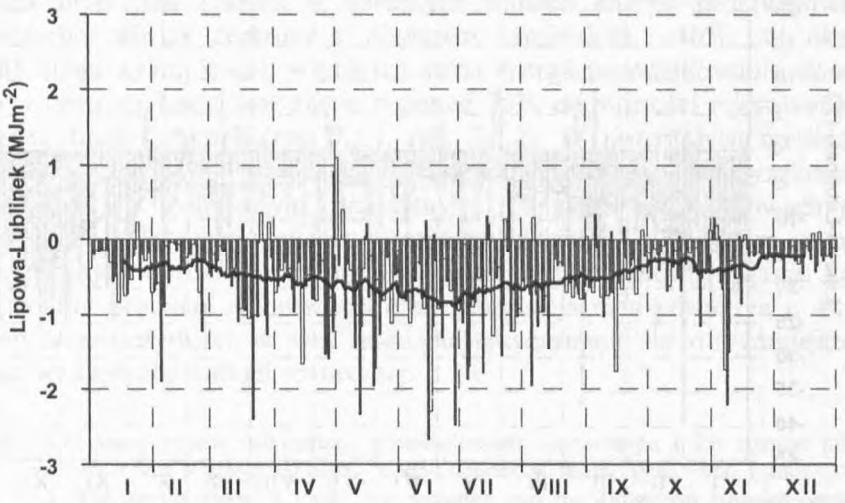
Ryc. 7.1.1. Średnie różnice sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego (w %, słupki) między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001. Średnia ruchoma 31-dniowa – linia ciągła

Fig. 7.1.1. The mean differences of the daily sums of total solar radiation (in %, bars) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in the years: 1998, 2000, 2001. The 31-day running average – solid line

Tabela 7.1.2. Średnie oraz najwyższe średnie różnice sum dobowych promieniowania całkowitego (w %) między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001

Table 7.1.2. The mean and the highest mean differences of the daily sums of total solar radiation (in %) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in years: 1998, 2000, 2001

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Średnia	–12	–10	–7	–6	–3	–4	–5	–4	–5	–5	–10	–15	–7
Max	–40	–24	–37	–14	–18	–16	–18	–11	–18	–20	–25	–28	–40



Ryc. 7.1.2. Średnie różnice sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego (w MJm^{-2}) między centrum Łodzi a stacją Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001. Średnia ruchoma 31-dniowa

Fig. 7.1.2. The mean differences of the daily sums of total solar radiation (in MJm^{-2}) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in the years: 1998, 2000, 2001. The 31-day running average – solid line

Tabela 7.1.3. Średnie różnice sum dobowych promieniowania całkowitego (w MJm^{-2}) między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001

Table 7.1.3. The mean differences of the daily sums of total solar radiation (in MJm^{-2}) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in years: 1998, 2000, 2001

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Średnia	0,29	–0,39	–0,47	–0,60	–0,57	–0,79	–0,66	–0,59	–0,45	–0,30	–0,36	–0,22	–0,47

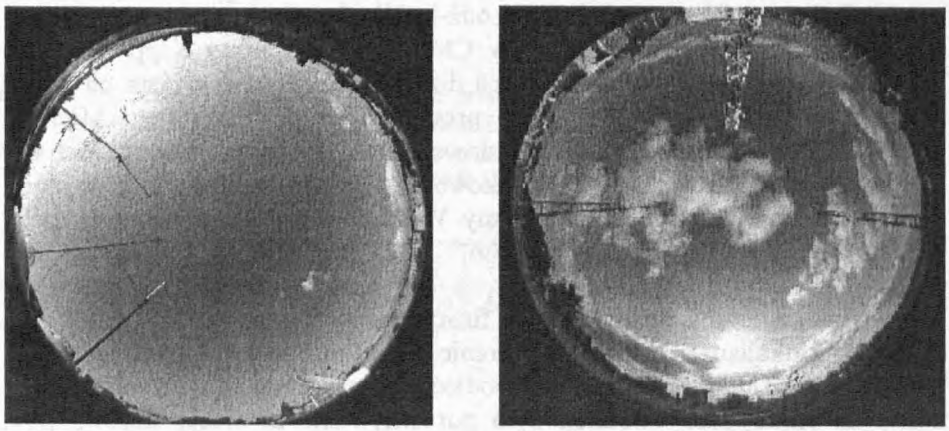
Promieniowanie całkowite w centrum Warszawy było redukowane w lecie o 2–5%, a w zimie o 9–14% w stosunku do obszarów zamiejskich. W opracowaniu dotyczącym serii całkowitego promieniowania słonecznego rejestrowanego w latach 1961–1990 w Warszawie (Kozłowska-Szczęsna, Podogrocki 1995) przedstawiono wyniki porównania ze stacjami zamiejskimi Belsk i Brwinów. Sumy roczne promieniowania całkowitego w Warszawie były średnio niższe o 8–10% (ok. 300 MJm^{-2}). W przebiegu rocznym sumy miesięczne w zimie cechowały się największymi różnicami na niekorzyść Warszawy, 15–20%. W miesiącach letnich różnice w stosunku do stacji zamiejskich wynosiły 3–10%. Średnie dzienne różnice promieniowania całkowitego między Belskiem a Warszawą wahały się od 4 do 14%, a w godzinach rannych i wieczornych przekraczały nawet 50%.

7.2. RÓŻNICE SUM DOBOWYCH ULTRAFIOLETOWEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO MIĘDZY CENTRUM ŁODZI A STACJĄ ZAMIEJSKĄ ŁÓDŹ-LUBLINEK

Porównanie sum energii promieniowania ultrafioletowego na stacji śródmiejskiej Łódź-Lipowa i zamiejskiej Łódź-Lublinek przeprowadzono w oparciu o krótką 22-dniową serię pomiarów w okresie 10 VI 2002–05 VII 2002. Pomiary natężenia ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego w wymienionym okresie na stacji Łódź-Lublinek zostały wykonane za pomocą mobilnego zestawu mierników CM11 i CUV3 firmy Kipp & Zonen w ramach eksperymentów badawczych dotyczących wpływu miasta na udział procentowy promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym. Mierniki były umieszczone horyzontalnie na drewnianym statywie na wysokości 180 cm nad powierzchnią gruntu. Dodatkowo do zestawu zamontowano czujniki temperatury powietrza HMP45C firmy Vaisala. Wartości natężenia promieniowania całkowitego i UV w Wm^{-2} oraz temperatury powietrza były próbkowane z częstotliwością 10 s, a 2-minutowe średnie wartości były zapisywane w pamięci rejestratora firmy Cambell typ 21 X. Stanowisko Lublinek zlokalizowane było na terenie ogródka meteorologicznego stacji IMGW Łódź-Lublinek, 1,8 m nad podłożem trawiastym. Przesłonięcie horyzontu na stanowisku Lublinek było porównywalne ze stacją Lipowa (ryc. 8.2.3), z tego względu czynnik ten jest wykluczony jako przyczyna zaistniałych różnic w natężeniu promieniowania słonecznego między stacjami. Synchroniczne pomiary promieniowania słonecznego były prowadzone na stacji Łódź-Lipowa (dach budynku Instytutu Nauk o Ziemi) za pomocą tego samego zestawu mierników. W celu zapewnienia porównywalności wyników dokonano kalibracji względnej dwóch wykorzystywanych w badaniach zestawów mierników CUV3 i CM11. Podstawą kalibracji była równo-

legła serii pomiarowa natężenia całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego ze stacji Lipowa z okresu 2 VIII 2001–6 V 2002. Zweryfikowane dane pomiarowe były podstawą tego opracowania. Wartość natężenia promieniowania całkowitego jest mierzona czujnikiem CM11 z dokładnością +/– 1 Wm^{-2} (wg danych producenta), rzeczywisty błąd pomiarów uwzględniający bezwładność przyrządu wynosi +/– 5 Wm^{-2}, błąd sum godzinnych wynosi 0,02 MJm^{-2}, błąd sum dobowych przy założeniu, że średnia długość dnia w okresie eksperymentów wynosi 16,5 godz. oszacowano na 0,3 MJm^{-2}. Miernik ultrafioletu CUV3 przystosowany jest do pomiaru natężenia promieniowania w zakresie 0,01–99,99 Wm^{-2}, dokładność pomiaru wg danych producenta wynosi 0,01 Wm^{-2}, realny błąd pomiaru wynosi +/– 0,04 Wm^{-2}. Błąd sum godzinnych ultrafioletu wynosi 0,0001 MJm^{-2}, błąd sum dobowych wynosi 0,002 MJm^{-2}.

Typ pogody w okresie eksperymentów badawczych w dniach 10 VI 2002–05 VII 2002 charakteryzował się porannymi rozpogodzeniami i wzrostem zachmurzenia konwekcyjnego w ciągu dnia. Pogoda bezchmurna wystąpiła w trzech dniach obserwacji, tj. 17–19 czerwca. Najwyższa temperatura powietrza notowana na stacji Łódź-Lublinek zmieniała się w zakresie od 16,7° C do 32,3° C. Najwyższa dzienna wysokość Słońca nad horyzontem w dniach pomiarów zmieniała się od 61,03° do 61,7°, a przeciętna długość dnia wynosiła 16,5 godz.



stacja Łódź-Lipowa
Łódź-Lipowa station

stanowisko Lublinek
Lublinek measurement site

Ryc. 7.2.1. Fotografie przesłonięcia horyzontu na stacji Łódź-Lipowa i na stanowisku Lublinek wykonane obiektywem typu „rybie oko" (wyk. A. Podstawczyńska)

Fig. 7.2.1. The „fish eye" photographs of the horizon obstruction at Łódź-Lipowa and at measurement site Lublinek (photo by A. Podstawczyńska)

Sumy dobowe całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na omawianych stacjach przedstawia tab. 8.2.4. W analizowanym okresie nie stwierdzono wyraźnej przewagi sum energii słonecznej rejestrowanych za miastem w stosunku do centrum Łodzi. W przypadku promieniowania całkowitego w ciągu 4 dni spośród 22 dni różnice między stacją zamiejską i śródmiejską mieściły się w granicach błędu pomiarowego (do 0,3 MJm^{-2}). W pozostałych dniach przewyższały wartość błędu na korzyść stacji Lipowa z wyjątkiem dwóch dni – 11 VI 2002 i 17 VI 2002, kiedy to suma energii słonecznej na Lublinku przewyższała wartość notowaną w centrum Łodzi o 0,5 MJm^{-2}.

W przypadku promieniowania UV w ciągu 7 dni spośród 22 dni pomiarów nie odnotowano różnic sum dobowych, w ciągu 7 dni wartości zarejestrowane za miastem przewyższały sumy dobowe rejestrowane w centrum miasta średnio o 0,04 MJm^{-2}, w pozostałych 8 dniach pomiarów sumy dobowe promieniowania UV na stacji Lipowa przewyższały sumy dobowe na stacji Lublinek o 0,3 MJm^{-2}. Podobnie brak wyraźnych różnic w natężeniu promieniowania UV za miastem i w centrum aglomeracji Warszawy – ich zmienny charakter przedstawili w opracowaniu dotyczącym promieniowania słonecznego w Warszawie Błażejczyk i Baranowski (2003). Autorzy stwierdzili niewielki wzrost natężenia ultrafioletu na stacji zamiejskiej Borowa Góra w wybranych dniach marca (2002 r.) i września (2001 r.), a niewielką przewagę natężenia promieniowania UV w centrum Warszawy odnotowali w maju (2002 r.) i znacznie większą w grudniu (2001 r.).

Analiza przebiegu dobowego udziału procentowego sum godzinnych promieniowania UV w sumach godzinnych promieniowania całkowitego ($R_{H_uv/t}$, ryc. 7.2.3–7.2.8) oraz średnich dobowych wartości $R_{H_uv/t}$ (tab. 7.2.2) wykazała, iż we wszystkich dniach pomiarów eksperymentalnych udział ten jest wyższy na stacji Lublinek niż na stacji Lipowa. Powyższy wzrost udziału promieniowania UV za miastem może być rezultatem większej ekstynkcji promieniowania całkowitego niż ultrafioletu, w wyniku zwiększonego pochłaniania przez parę wodną głównie fal z zakresu bliskiej podczerwieni. Stacja Lublinek ze względu na większą ewapotranspirację (podłoże trawiaste, szata roślinna w otoczeniu stacji) charakteryzuje się większą zawartością pary wodnej w powietrzu niż centrum miasta. Średnia dobowa prężność pary wodnej na stacji Lublinek w analizowanym okresie pomiarów eksperymentalnych wynosiła 15,2 hPa, podczas gdy na Lipowej była niższa średnio o 0,6 hPa i wynosiła 14,6 hPa. Średni dobowy udział promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym na stacji Lublinek wyniósł 4,0%, a na stacji Lipowa był średnio niższy o 0,2% i wyniósł 3,8%.

Tabela 7.2.1. Sumy dobowe całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na stacjach Lublinek i Lipowa w okresie 11 VI – 04 VII 2002

Table 7.2.1. The daily sums of total and UV solar radiation at Lublinek and at Lipowa stations in the period 11 June – 04 July 2002

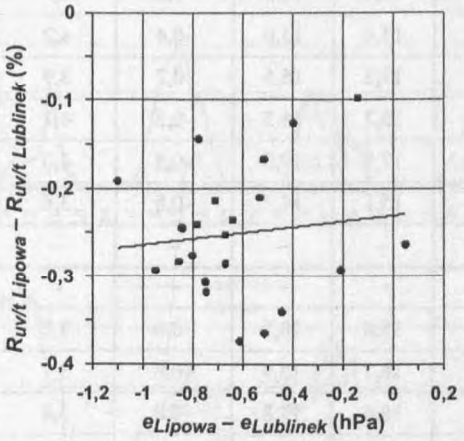
Lp.	Data	D_t (MJ m^{-2})		D_{uv} (MJ m^{-2})	
		Lublinek	Lipowa	Lublinek	Lipowa
1	11 VI 2002	8,75	8,28	0,38	0,35
2	12 VI 2002	25,6	26,3	0,98	0,94
3	13 VI 2002	16,5	17,8	0,67*	0,67*
4	14 VI 2002	14,72	16,47	0,62	0,66
5	15 VI 2002	23,09	24,87	0,90*	0,90*
6	16 VI 2002	20,8	23,47	0,85	0,88
7	17 VI 2002	20,12	19,73	0,81	0,76
8	18 VI 2002	28,28	29,7	1,04	1,02
9	19 VI 2002	–	–	–	–
10	20 VI 2002	–	–	–	–
11	21 VI 2002	27,49	29,63	1,03*	1,03*
12	22 VI 2002	24,71*	24,81*	0,94	0,89
13	23 VI 2002	21,53	24,14	0,85	0,88
14	24 VI 2002	6,91*	7,21*	0,31	0,32
15	25 VI 2002	23,06	26,06	0,89	0,94
16	26 VI 2002	22,08*	22,27*	0,83	0,80
17	27 VI 2002	21,25	23,02	0,81*	0,81*
18	28 VI 2002	11,12	12,07	0,47*	0,47*
19	29 VI 2002	11,42	12,44	0,50	0,52
20	30 VI 2002	21,65	24,71	0,86	0,89
21	1 VII 2002	17,70	19,03	0,72*	0,72*
22	2 VII 2002	20,66*	20,73*	0,78	0,75
23	3 VII 2002	20,00	22,67	0,81	0,83
24	04 VII 2002	5,61	6,05	0,28*	0,28*

* Różnice w granicach błędu pomiarowego lub brak różnic.

* Differences within the limits of measurement error or lack of differences.

Ryc. 7.2.2 przedstawia wzajemną zależność różnic udziału ultrafioletu i prężności pary wodnej między centrum miasta a stacją zamiejską. Generalną prawidłowością jest, że przewaga udziału ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym na stacji Lublinek wzrasta wraz ze wzrostem prężności pary wodnej w stosunku do centrum miasta.

Przedstawione tu hipotetyczne przyczyny zaistniałych różnic między udziałem procentowym promieniowania UV w promieniowaniu całkowitym notowanym na stacji śródmiejskiej i w terenie zamiejskim wymagają dalszych badań na podstawie dłuższej serii obserwacyjnej.



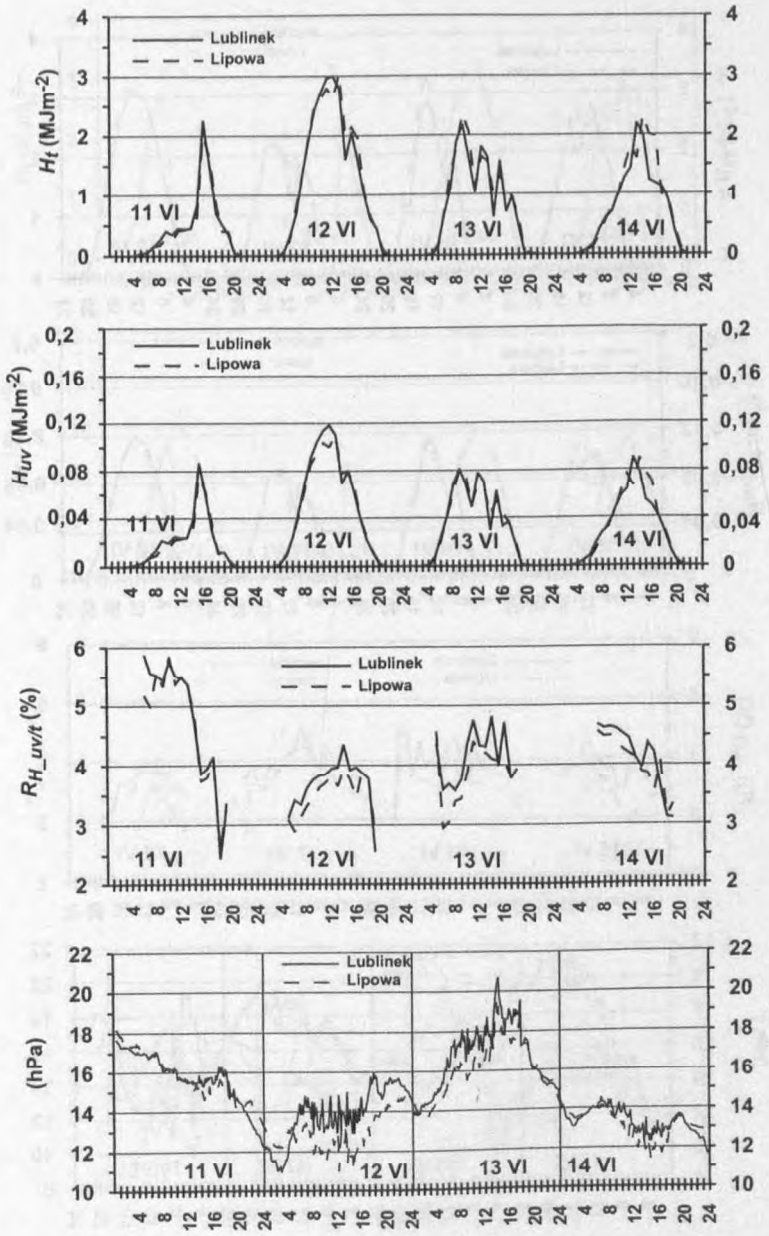
Ryc. 7.2.2. Zależność średnich dobowych różnic udziału procentowego promieniowania UV ($R_{uv/t}$) w promieniowaniu całkowitym od średnich dobowych różnic prężności pary wodnej (e) między stacjami Łódź-Lipowa i Łódź-Lublinek w okresie 11 VI – 4 VII 2002

Fig. 7.2.2. Relationship between the mean daily differences of the ratio of UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) and the mean daily differences of water vapour pressure (e) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 11 June – 4 July 2002

Tabela 7.2.2. Średnie dobowe wartości prężności pary wodnej (e), udziału sum godzinnych promieniowania UV w sumach godzinnych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$) oraz różnic miedzy stacją Lipowa a Lublinek w okresie 11 VI – 4 VII 2002

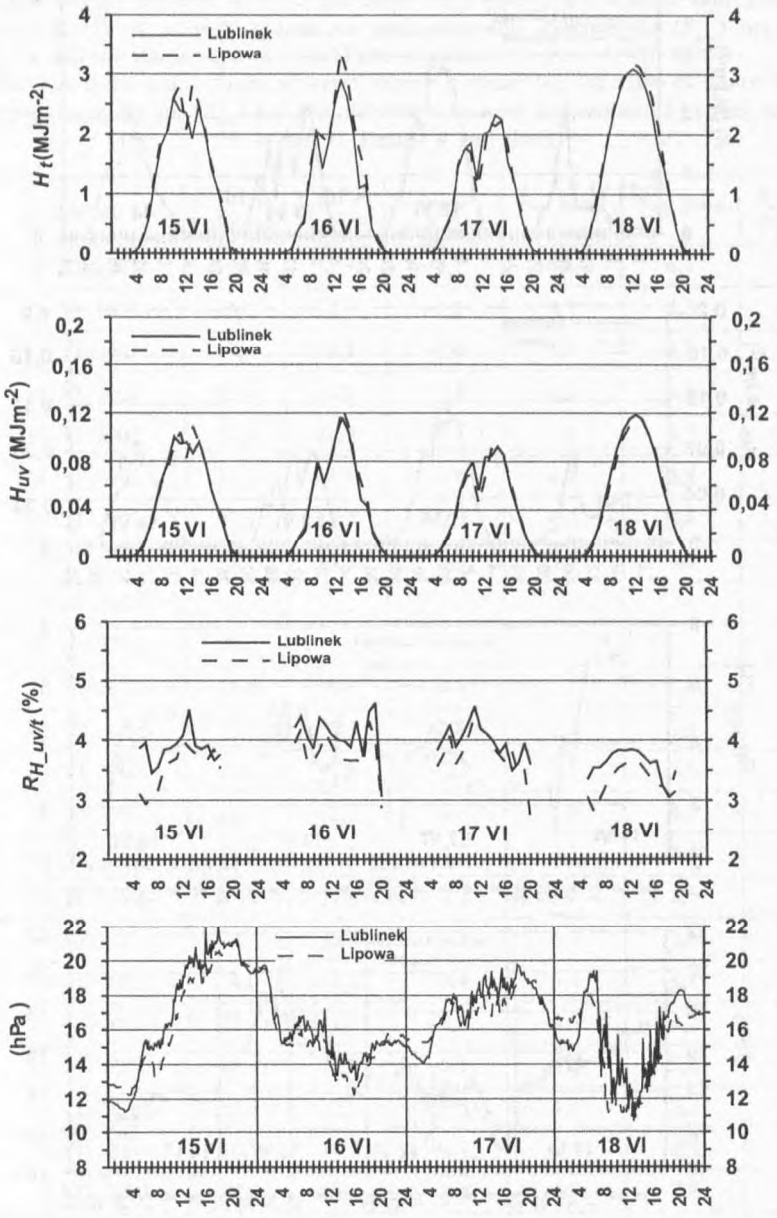
Table 7.2.2. The mean daily values of water vapour pressure (e), the ratio of hourly sums of UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) and the differences between Lipowa and Lublinek station in the period 11 June – 4 July 2002

Lp.	Data	e (hPa) Lublinek	e (hPa) Lipowa	$e_{Lipowa} - e_{Lublinek}$	$R_{uv/t\ Lublinek}$	$R_{uv/t\ Lipowa}$	$R_{uv/t\ Lipowa} - R_{uv/tLublinek}$
1	11 VI 2002	16,1	15,9	–0,1	4,8	4,7	–0,1
2	12 VI 2002	13,7	12,6	–1,1	3,7	3,5	–0,2
3	13 VI 2002	17,4	16,5	–1,0	4,1	3,8	–0,3
4	14 VI 2002	13,4	13,0	–0,4	4,2	4,0	–0,2
5	15 VI 2002	17,2	16,5	–0,7	3,9	3,5	–0,4
6	16 VI 2002	15,2	14,5	–0,8	4,1	3,8	–0,3
7	17 VI 2002	17,5	17,0	–0,5	4,0	3,8	–0,2
8	18 VI 2002	15,1	14,2	–0,8	3,6	3,3	–0,3
9	19 VI 2002	–	–	–	–	–	–
10	20 VI 2002	–	–	–	–	–	–
11	21 VI 2002	18,8	18,1	–0,6	3,7	3,4	–0,3
12	22 VI 2002	16,7	15,9	–0,8	3,7	3,6	–0,1
13	23 VI 2002	18,6	17,8	–0,8	3,8	3,6	–0,2
14	24 VI 2002	15,9	15,2	–0,7	4,9	4,6	–0,3
15	25 VI 2002	11,5	10,8	–0,7	3,7	3,4	–0,3
16	26 VI 2002	13,4	12,9	–0,5	3,7	3,5	–0,2
17	27 VI 2002	14,1	13,3	–0,9	3,9	3,6	–0,3
18	28 VI 2002	14,0	13,6	–0,4	4,4	4,1	–0,3
19	29 VI 2002	11,4	11,2	–0,2	4,5	4,2	–0,3
20	30 VI 2002	11,1	10,5	–0,6	4,0	3,6	–0,4
21	1 VII 2002	12,8	12,0	–0,8	4,1	3,8	–0,3
22	2 VII 2002	16,3	15,5	–0,7	3,9	3,7	–0,2
23	3 VII 2002	18,9	18,4	–0,5	4,2	3,8	–0,4
24	4 VII 2002	18,7	18,7	0,1	4,9	4,6	–0,3



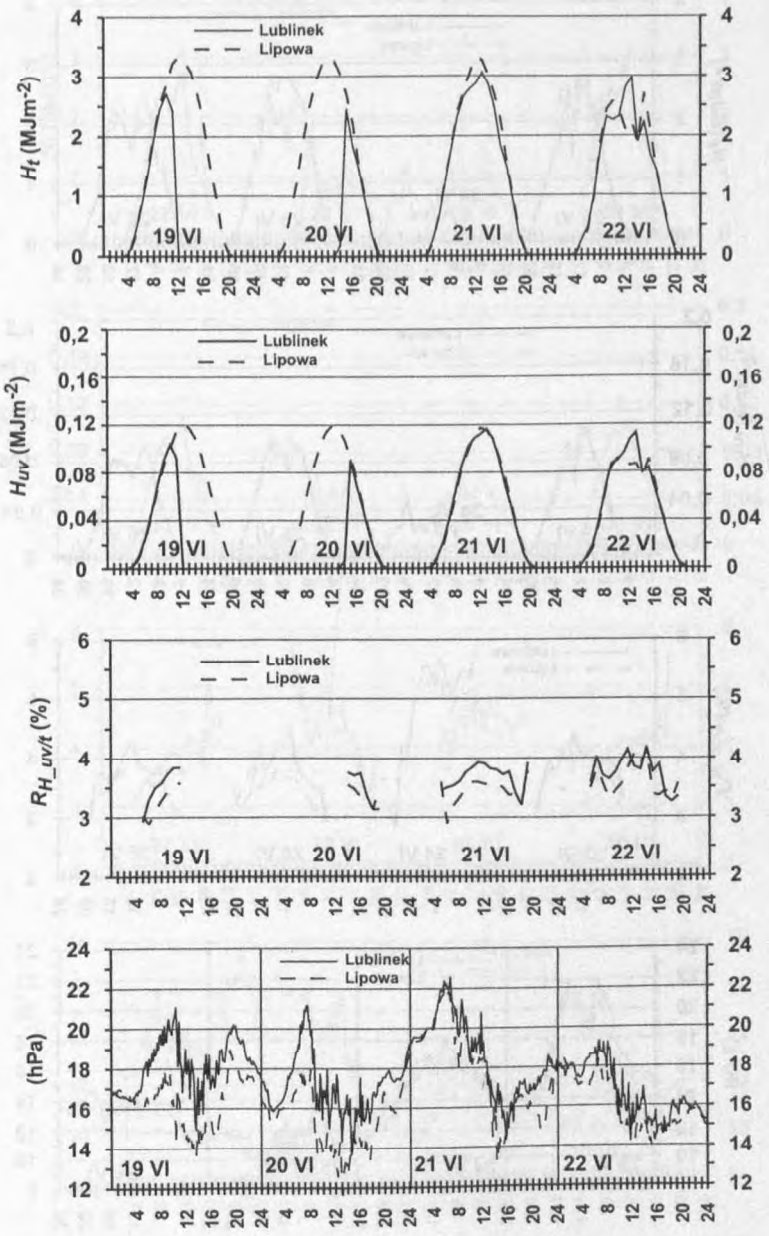
Ryc. 7.2.3. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 11–14 VI 2002

Fig. 7.2.3. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 11–14 June 2002



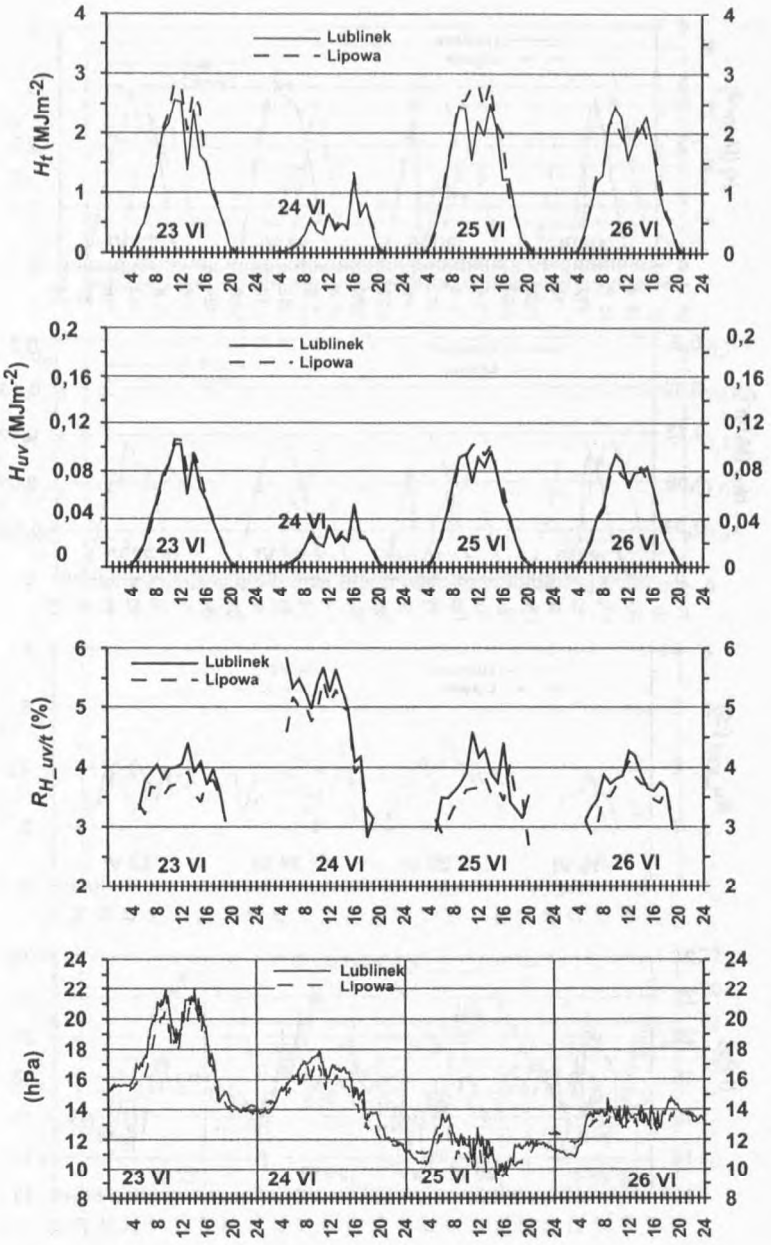
Ryc. 7.2.4. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 15–18 VI 2002

Fig. 7.2.4. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 15–18 June 2002



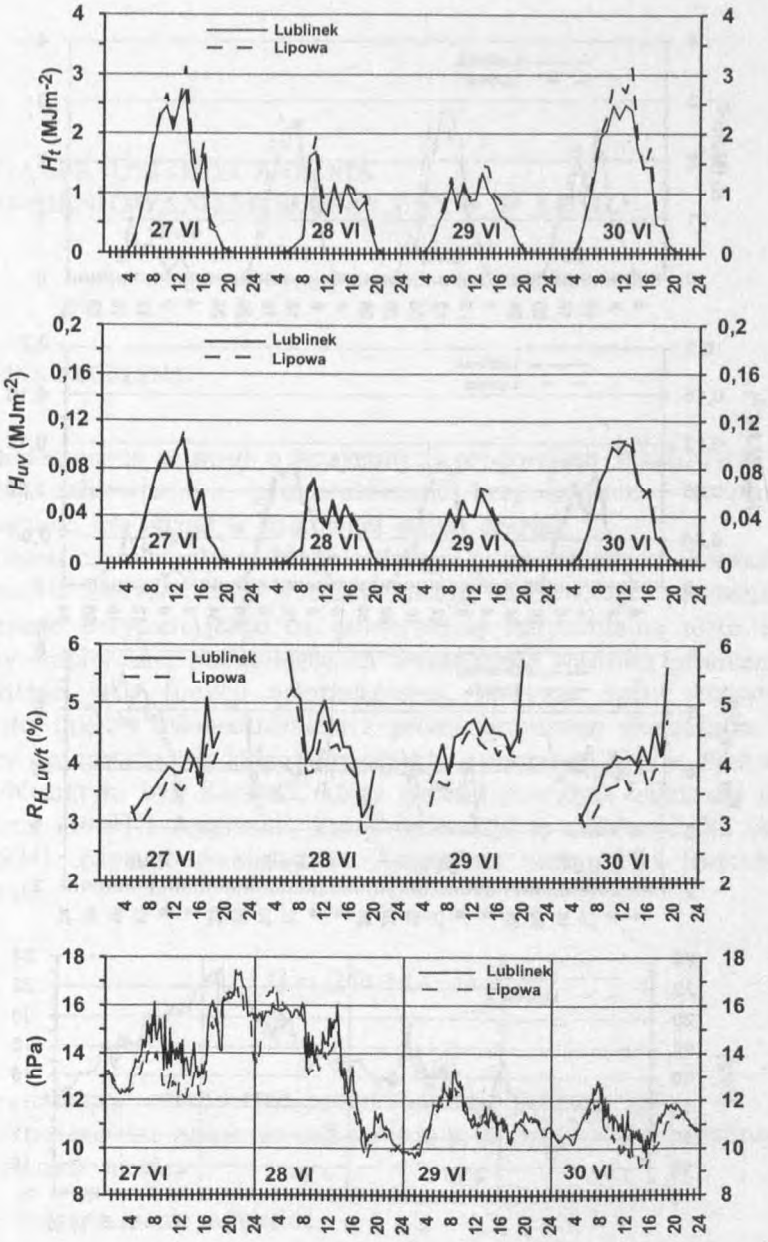
Ryc. 7.2.5. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 19–22 VI 2002

Fig. 7.2.5. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 19–22 June 2002



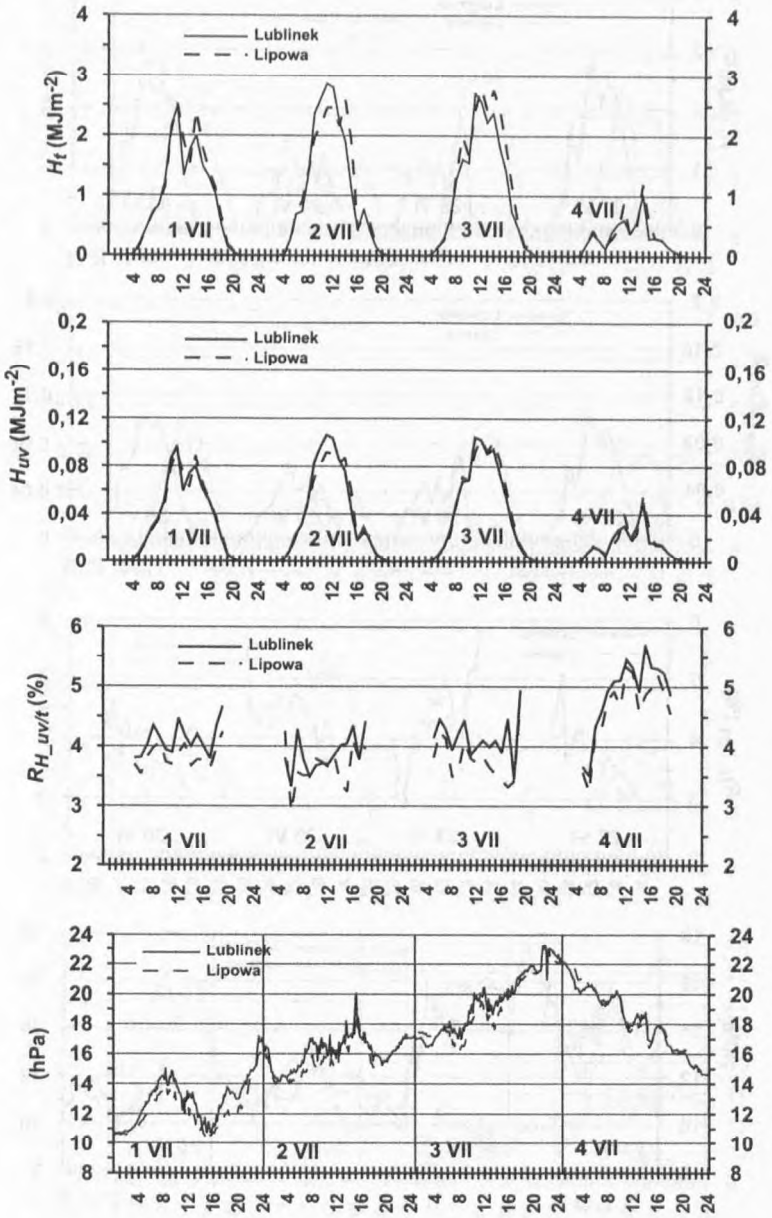
Ryc. 7.2.6. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 23–26 VI 2002

Fig. 7.2.6. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 23–26 June 2002



Ryc. 7.2.7. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 27–30 VI 2002

Fig. 7.2.7. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 27–30 June 2002



Ryc. 7.2.8. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 1–4 VII 2002

Fig. 7.2.8. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 1–4 July 2002

8. ZWIĄZEK USŁONECZNIENIA Z PROMIENIOWANIEM SŁONECZNYM W ŁODZI

8.1. ZARYS PROBLEMU

Usłonecznienie stanowi o wzajemnych proporcjach składowych promieniowania całkowitego – promieniowaniu bezpośrednim i rozproszonym – kształtując ich udział w całkowitej sumie energii.

Związek czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego do powierzchni horyzontalnej i sumy energii całkowitego promieniowania słonecznego przypadającego na powierzchnię horyzontalną ujęto w liczne formuły empiryczne, pozwalające na wyznaczenie wartości promieniowania całkowitego jako funkcji usłonecznienia. Pierwsze opisy statystycznych zależności między usłonecznieniem a promieniowaniem słonecznym pojawiły się w opracowaniach klimatologicznych z początku XX w. Prekursorami tej problematyki byli Kimball, który określił powyższą zależność dla Waszyngtonu (1919) i Angström, który wyznaczył tę zależność dla Sztokholmu (1924). Zaproponowana przez Angströma następująca formuła matematyczna:

$$Q = Q_0[a + (a-1)\frac{s}{S}],$$

gdzie:

Q – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego,

Q_0 – potencjalne natężenie całkowitego promieniowania słonecznego przy bezchmurnym niebie,

$\frac{s}{S}$ – usłonecznienie względne,

a – parametr (wg badań Angströma $a = 0{,}25$),

zyskała popularność wśród klimatologów i była wykorzystywana przez wielu autorów jako podstawa do tworzenia nowych, zmodyfikowanych wersji tej zależności (Black i in. 1954; Glover, McCulloch 1958, Berljand 1961 i in.).

W polskich opracowaniach klimatologicznych najszersze zastosowanie jako pośrednia metoda wyznaczania strumienia energii całkowitego promieniowania słonecznego znalazła formuła Angströma zmodyfikowana przez Blacka:

$$\downarrow K = \downarrow K_0(a + b\frac{s}{s_0})$$

gdzie:

$\downarrow K$ – suma dobowa całkowitego promieniowania słonecznego w MJm^{-2},

$\downarrow K_0$ – dobowa suma promieniowania całkowitego na górnej granicy atmosfery w MJm^{-2},

$\frac{s}{s_0}$ – usłonecznienie względne (część jedności), tj. stosunek usłonecznienia rzeczywistego s w godz. do usłonecznienia astronomiczne możliwego s_0 w godz.,

a i b – współczynniki regresji.

Część formuły Blacka ujęta w nawiasie określa oddziaływanie atmosfery na dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi, jest to tzw. czynnik meteorologiczny. Składnik wzoru $\downarrow aK_0$ charakteryzuje strumień promieniowania rozproszonego, składnik wzoru $\downarrow bK_0\frac{s}{s_0}$ charakteryzuje strumień promieniowania bezpośredniego (Black i in. 1954, Miara i in. 1987).

Wartości współczynników a i b we wzorze Blacka wyznacza się na podstawie liniowej zależności między wartością współczynnika transmisji promieniowania całkowitego (stosunek sum energii promieniowania całkowitego zmierzonego przy powierzchni ziemi do sum energii na górnej granicy atmosfery na powierzchni horyzontalnej, (tj. $\frac{\downarrow K}{\downarrow K_0}$) i usłonecznienia względnego (tj. $\frac{s}{s_0}$) (Black i in. 1954; Podogrocki 1978).

Formuła Blacka została wykorzystana przez Kuczmarską i Paszyńskiego (1964) do prezentacji rozkładu promieniowania całkowitego na obszarze Polski oraz w Atlasie Bilansu Promieniowania (Paszyński 1966) do obliczania sum miesięcznych promieniowania całkowitego. Ze względu na ówczesny brak danych o promieniowaniu całkowitym z polskich stacji meteorologicznych w powyższych opracowaniach przyjęto średnie wartości współczynników regresji (a, b) wyznaczonych przez Blacka i in. (1954) dla szerokości geograficznej 51–52°N. W 1970 r. L. Kuczmarska wyznaczyła współczynniki regresji do wzoru Blacka na podstawie danych empirycznych z czterech polskich stacji (Gdynia, Suwałki, Warszawa, Brwinów). Autorka zbadała zależność

między czasem usłonecznienia a promieniowaniem słonecznym na podstawie trzyletniej serii danych (1964–1966), wykazując sezonowe wahania współczynników regresji, a także ich zróżnicowanie przestrzenne. Najmniejszą zmiennością sezonową wartości współczynników cechowała się Warszawa, największą Suwałki.

Podogrocki w opracowaniu dotyczącym przestrzennego rozkładu promieniowania całkowitego w Polsce (1978) uzasadnił wybór wzoru Blacka jako najlepiej odzwierciedlającego warunki rzeczywiste na obszarze Polski, spośród ośmiu formuł empirycznych (Angströma, Blacka, Glovera, Ukraintseva, Savinowa, Kimballa, Angströma-Savinowa, Berljand) określających związek promieniowania słonecznego z usłonecznieniem lub zachmurzeniem. Przydatność wzoru Blacka dla warunków Polski Podogrocki przeanalizował na podstawie serii danych z sześciu stacji aktynometrycznych (Gdynia, Kołobrzeg, Suwałki, Warszawa, Brwinów, Zakopane) z lat 1958–1967. Autor zwrócił uwagę na zmienność współczynników regresji w skali roku i ich odwrotny stosunek. Generalnie wartość współczynnika *b* spada wraz ze wzrostem zachmurzenia. Przeciwną tendencją cechuje się wartość współczynnika *a*, który wzrasta wraz ze wzrostem udziału promieniowania rozproszonego (tab. 8.1.1). Wartości wyliczonych współczynników z uwzględnieniem ich rocznego przebiegu posłużyły autorowi do obliczenia średnich dobowych wartości promieniowania słonecznego dla poszczególnych miesięcy i roku na postawie rejestracji usłonecznienia z lat 1951–1970 dla 60 polskich stacji.

Tabela 8.1.1. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) w formule Blacka dla Polski wg Podogrockiego

Table 8.1.1. The values of regression coefficients (*a*, *b*) of Black's formula for Poland by Podogrocki

Współczynniki regresji	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
a	0,210	0,210	0,215	0,215	0,210	0,225	0,225	0,215	0,220	0,195	0,170	0,200	0,209
b	0,555	0,585	0,595	0,575	0,580	0,560	0,550	0,540	0,530	0,555	0,595	0,570	0,565

Rezultaty badań Podogrockiego (1978) zostały wykorzystane w opracowaniu dotyczącym zróżnicowania przestrzennego bilansu promieniowania na obszarze Polski (Miara i in., 1987). Przyjmując wartości współczynników regresji wg Podogrockiego, autorzy wymienionego opracowania zastosowali formułę Blacka do wyznaczenia strumienia promieniowania całkowitego dla 31 stacji IMGW w Polce w latach 1956–1975. Współczynniki wyznaczone przez Podogrockiego zastosował także Kuczmarski (1977) w charakterystyce

rozkładu promieniowania całkowitego w północnych regionach Polski. Wzór Blacka wykorzystała w opracowaniu modelu bilansu cieplnego ciała człowieka Krawczyk (1993). Przydatność metody pośredniej wyznaczania wartości promieniowania całkowitego przy zastosowaniu formuły Blacka, ze względu na dobre dopasowanie do wartości empirycznych postulują Raik i Pahapiłł (1986). Wymienieni autorzy analizowali dane o promieniowaniu słonecznym i usłonecznieniu z obszaru Estonii, uzyskując liniowy związek między tymi elementami, o współczynniku korelacji powyżej 0,90.

Poznanie charakterystyki solarnej, jaką jest usłonecznienie względne, pozwala wnioskować nie tylko o dobowej wartości całkowitego promieniowania słonecznego, ale także o dobowych sumach energii promieniowania ultrafioletowego (Sadler 1992). Formułę Angströma zmodyfikowaną przez Blacka do wyznaczenia dziennych sum ultrafioletu na podstawie wartości usłonecznienia względnego w Edmonton (53°34'N, 113°34'W), Kanada, zastosował Sadler (1992):

$$\frac{UVM}{UVH_0} = a + b\left(\frac{s}{s_0}\right),$$

gdzie:

UVM – to empiryczne dobowe sumy energii całkowitego promieniowania ultrafioletowego przy powierzchni ziemi (MJm^{-2}),

UVH_0 – dobowe sumy energii promieniowania ultrafioletowego na górnej granicy atmosfery na powierzchni horyzontalnej (MJm^{-2}),

s – dobowe usłonecznienie rzeczywiste,

s_0 – usłonecznienie astronomicznie możliwe (długość dnia),

a i b – współczynniki regresji.

Liniowa zależność między wartością współczynnika transmisji promieniowania ultrafioletowego (stosunek sumy dobowej ultrafioletu zmierzonej przy powierzchni ziemi do sumy dobowej na górnej granicy atmosfery (tj. $\frac{UVM}{UVH_0}$) i usłonecznieniem względnym (tj. $\frac{s}{s_0}$) charakteryzowała się współczynnikiem korelacji w zakresie od 0,71 w grudniu do powyżej 0,90 od kwietnia do sierpnia. Współczynniki regresji a i b wyznaczone dla Edmonton na podstawie 4-letniej (1983–1986) serii pomiarów ultrafioletu (280–395 nm) cechowały się roczną zmiennością (tab. 8.1.2). Współczynnik a zmieniał się od 0,109 w czerwcu do 0,193 w styczniu i lutym, podczas gdy wartość współczynnika b była najniższa w grudniu, 0,093, a najwyższa w czerwcu, 0,246 (Sadler 1992).

Tabela 8.1.2. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) w formule Blacka zastosowanej do szacowania sum dobowych ultrafioletu wg Sadlera (1992)
Table 8.1.2. The values of regression coefficients of Black's formula apply to estimate the daily values of ultraviolet by Sadler (1992)

Współczynniki regresji	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
a	0,193	0,193	0,177	0,127	0,110	0,109	0,142	0,155	0,113	0,144	0,142	0,168	0,152
b	0,145	0,142	0,198	0,211	0,235	0,246	0,215	0,203	0,236	0,183	0,166	0,093	0,186

Ze względu na skromną bazę danych empirycznych o promieniowaniu słonecznym w Polsce zasadne jest rozwijanie badań nad związkiem komplementarnych elementów meteorologicznych, jakimi są usłonecznienie i promieniowanie słoneczne. Pomiary usłonecznienia w Polsce prowadzone przez gęstą sieć heliograficzną (ponad 100 punktów pomiarowych) stanowią tło dla mniej powszechnych stacji aktynometrycznych (26 stacji) (Bogdańska i in. 2002). Ponadto polskie stacje heliograficzne dysponują długoletnim materiałem obserwacyjnym (znaczny odsetek stacji z ponad 30-letnim ciągiem pomiarów), stanowiącym cenne źródło danych do pośredniego szacowania wielkości dopływu promieniowania słonecznego.

8.2. ZASTOSOWANIE FORMUŁY BLACKA DO SZACOWANIA SUM DOBOWYCH CAŁKOWITEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W ŁODZI

Wyniki badań Kuczmarskiej (1970) i Podogrockiego (1978) nad związkiem między czasem dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego a całkowitym promieniowaniem słonecznym na obszarze Polski wskazują na zróżnicowany charakter tej zależności, zarówno w aspekcie przestrzennym jak i czasowym. Autorzy postulują, aby wyznaczając teoretyczne sumy energii całkowitego promieniowania słonecznego dla stacji reprezentujących różne obszary Polski, uwzględnić we wzorze Blacka zróżnicowane w aspekcie czasowym i regionalnym współczynniki regresji *a* i *b*.

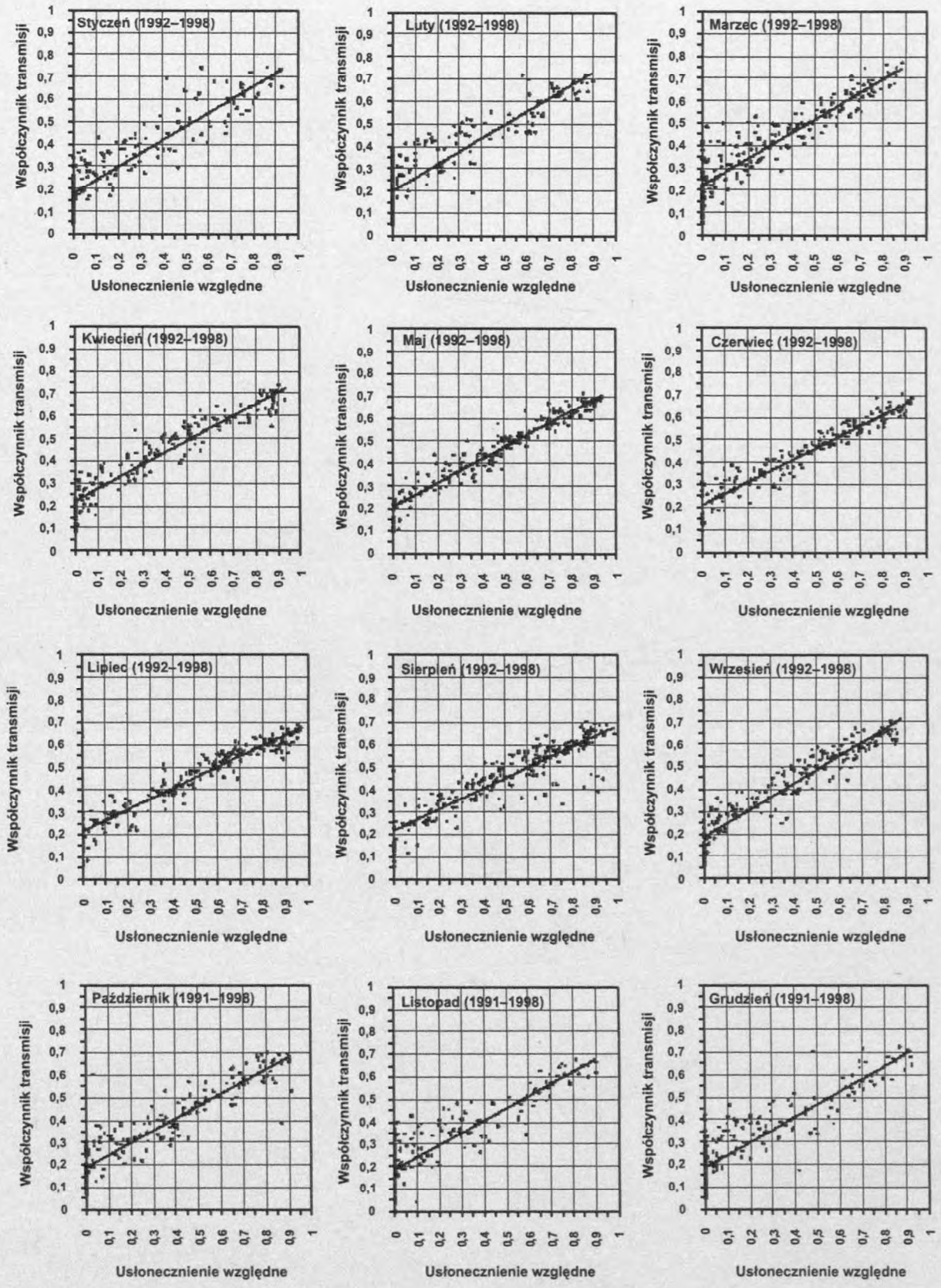
Uśrednione współczynniki regresji dla całego obszaru kraju zostały wyznaczone przez Podogrockiego (1978) na podstawie analizy danych pochodzących jedynie z sześciu stacji meteorologicznych niereprezentujących warunków solarnych centralnej Polski. Zasadne zatem jest podjęcie problematyki określenia związku usłonecznienia z promieniowaniem słonecznym w oparciu o analizę danych empirycznych z Łodzi w celu zminimalizowania błędów estymacji sum energii promieniowania słonecznego.

W tym opracowaniu współczynniki regresji do wzoru Blacka wyznaczono na podstawie analizy dobowych wartości usłonecznienia względnego i całkowitego promieniowania słonecznego ze stacji Łódź-Lublinek w latach 1991–1998. Sumy dobowe promieniowania całkowitego na górnej granicy atmosfery wyznaczono za pomocą formuł podanych w *Tablicach słonecznych...* (1976). Dokładny opis procedury obliczeniowej sum energii na granicy atmosfery oraz współczynnika transmisji promieniowania całkowitego przedstawiono w podrozdziale 3.3. Oszacowano stopień dopasowania do danych empirycznych sum energii promieniowania całkowitego obliczonych z zastosowaniem współczynników regresji wyznaczonych dla Łodzi i uśrednionych współczynników regresji dla Polski wg Podogrockiego. Przeanalizowano istotność różnic modelu regresji liniowej, wyznaczonego dla kraju i na podstawie analizy łódzkiej serii pomiarowej.

Rycina 8.2.1 przedstawia wykresy rozrzutu wartości współczynnika transmisji całkowitego promieniowania słonecznego w funkcji usłonecznienia względnego dla poszczególnych miesięcy. Największe rozproszenie wartości cechuje miesiące zimowe, od listopada do lutego. Najsilniejsza zależność liniowa usłonecznienia względnego i całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi występuje w maju i czerwcu, kiedy to współczynniki korelacji przekraczają wartość 0,95 (tab. 8.2.1, ryc. 8.2.1). Najmniejszym współczynnikiem korelacji w roku charakteryzuje się listopad, 0,87. Współczynniki korelacji dla wszystkich miesięcy spełniają kryterium istotności statystycznej.

Analiza wartości współczynnika determinacji wskazuje, że ponad 90% zmienności promieniowania całkowitego w maju, czerwcu i wrześniu może być wyjaśniona zmiennością usłonecznienia. W listopadzie tylko 75% zmienności promieniowania całkowitego można odnieść do zmienności usłonecznienia (tab. 8.2.1).

Roczne wartości współczynników a i b wyznaczone dla Łodzi na podstawie danych empirycznych o całkowitym promieniowaniu słonecznym i usłonecznieniu względnym wynoszą odpowiednio 0,201 i 0,546, i wykazują różnice w stosunku do współczynników wyznaczonych przez Podogrockiego, tj. $a = 0{,}209$, $b = 0{,}565$. Analizowane różnice w stosunku do współczynników wyznaczonych przez Blacka i in. (1954) dla pasa równoleżnikowego 51–52°N, tj. $a = 0{,}190$, $b = 567$, mają podobny charakter. Większe odchylenia parametrów regresyjnych formuły Blacka dla Łodzi w stosunku do wyznaczonych dla Polski przez Podogrockiego ujawniają się w wartościach miesięcznych (tab. 8.1.1, tab. 8.2.1). W przebiegu rocznym wrzesień charakteryzuje się największym współczynnikiem b dla Łodzi, 0,599, a najmniejszym – sierpień, 0,466. Według średnich wartości dla Polski najmniejszy współczynnik b wynosi 0,530 i cechuje wrzesień, a największy, 0,595, charakteryzuje luty i listopad. Współczynnik a dla Łodzi jest najmniejszy w styczniu, 0,179,



Ryc. 8.2.1. Współczynnik transmisji całkowitego promieniowania słonecznego jako funkcja usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1991–1998

Fig. 8.2.1. The transmission coefficient of total solar radiation as a function of relative solar radiation in Łódź in the period 1991–1998

a największy w lutym, 0,222 (tab. 8.2.1). Średni dla Polski współczynnik *a* najniższą wartość osiąga w listopadzie, 0,170, a największą w czerwcu i lipcu, 0,225. Na zróżnicowanie współczynników regresji w poszczególnych miesiącach ma wpływ czynnik meteorologiczny związany ze zmiennością zachmurzenia i przezroczystością atmosfery, kształtujących wartości usłonecznienia względnego i transmisji promieniowania całkowitego w atmosferze.

Tabela 8.2.1. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) dla Łodzi do szacowania sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego i ich charakterystyki statystyczne
Table 8.2.1. The values of regression coefficients (*a*, *b*) for Łódź to estimate the daily values of total solar radiation and the statistical characteristics

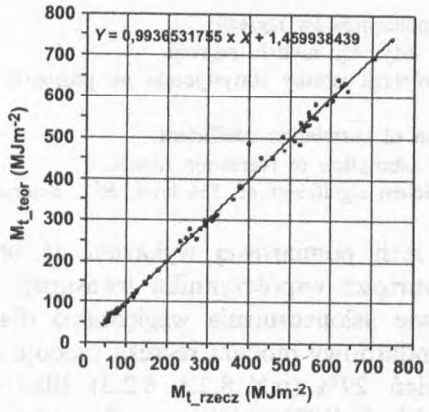
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
a	0,179	0,198	0,222	0,220	0,206	0,211	0,216	0,218	0,184	0,188	0,187	0,185	0,198
b	0,598	0,590	0,587	0,540	0,534	0,498	0,475	0,466	0,599	0,547	0,546	0,566	0,541
**Sig a*	0,006	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,009	0,006	0,007	0,006	0,005	0002
**Sig b*	0,019	0,020	0,018	0,014	0,011	0,011	0,011	0,015	0,013	0,018	0,019	0,019	0,005
***Sig$_e$*	0,079	0,081	0,076	0,058	0,051	0,046	0,052	0,065	0,056	0,073	0,079	0,079	0,071
R	0,899	0,904	0,908	0,943	0,951	0,954	0,941	0,896	0,949	0,911	0,870	0,876	0,921
R^2	0,809	0,817	0,825	0,890	0,905	0,911	0,887	0,804	0,902	0,831	0,758	0,768	0,849

* Błąd estymacji współczynników regresji.
** Błąd standardowy estymacji modelu regresji.
R – współczynnik korelacji istotny statystycznie na poziomie 5%, R^2 – współczynnik determinacji.
* Error of estimation of correlation coefficient.
** Standard error of estimation of regression model.
R – correlation coefficient significant on 5% level, R^2 – determination coefficient.

Analiza łódzkiej serii pomiarowej wykazała, iż błąd standardowy estymacji dobowych wartości współczynnika transmisji promieniowania całkowitego na podstawie usłonecznienia względnego dla roku wynosi 16%. Najmniejszy błąd standardowy modelu regresji cechuje maj i czerwiec, 10%, a największy – grudzień, 29% (tab. 8.2.1, 8.2.3). Błąd standardowy modelu regresji wg Podogrockiego (1978) obliczony dla wybranych stacji w Polsce jest mniejszy od 17,9% dla dekad i 12% dla miesięcy.

Teoretyczne sumy dobowe promieniowania całkowitego wyznaczone za pomocą wzoru Blacka z zastosowaniem nowych współczynników regresji dla Łodzi oraz współczynników regresji dla Polski wg Podogrockiego porównano z wartościami rzeczywistymi z lat 1991–1998. Wartości teoretyczne całkowitego promieniowania słonecznego wyznaczone na podstawie

usłonecznienia względnego z zastosowaniem nowych współczynników regresji dla Łodzi różnią się od wartości rzeczywistych nie więcej niż 1%. Rycina 8.2.2 przedstawia liniową zależność korelacyjną między teoretycznymi a doświadczalnymi sumami miesięcznymi promieniowania całkowitego w Łodzi. Bezwzględne wartości teoretycznego promieniowania całkowitego z zastosowaniem nowych współczynników dla Łodzi różnią się od wartości rzeczywistych przeciętnie o –0,1 MJm^{-2} w sierpniu i –2,11 MJm^{-2} w czerwcu, a sumy roczne różnią się o –3,31 MJm^{-2}. Znacznie większe różnice, szczególnie w miesiącach letnich, dają współczynniki Podogrockiego. Dla sum miesięcznych największymi odchyleniami od wartości rzeczywistych cechuje się lipiec, + 61,25 MJm^{-2}, dla sum rocznych odchylenie od średnich wieloletnich wynosi + 217,82 MJm^{-2} (tab. 8.2.2). Współczynniki Podogrockiego dają odchylenia względne sum miesięcznych promieniowania całkowitego od wartości empirycznych o 1,2% (marzec) do 10,3% (lipiec) i 5,8% dla sumy rocznej (tab. 8.2.3). Odchylenia te mieszczą się w granicach błędu szacunku równania regresji, co zostało również potwierdzone przez porównanie współczynników transmisji promieniowania całkowitego dla wartości rzeczywistych i wartości teoretycznych obliczonych wg modelu regresji Podogrockiego (tab. 8.2.2, 8.2.3). Model regresji liniowej wyznaczony na podstawie analizy łódzkiej serii pomiarowej nie różni się zatem istotnie od modelu regresji dla Polski.



Ryc. 8.2.2. Zależność korelacyjna teoretycznych (M_{t_teor}) i doświadczalnych (M_{t_rzecz}) sum miesięcznych promieniowania całkowitego w Łodzi w latach 1991–1998

Fig. 8.2.2. Correlation of the theoretical (M_{t_teor}) and the empirical (M_{t_rzecz}) monthly sums of total solar radiation in Łódź in the period 1991–1998

Tabela 8.2.2. Odchylenia sum miesięcznych całkowitego promieniowania słonecznego wyznaczonych dla Łodzi wg formuły Blacka z zastosowaniem nowych współczynników regresji dla Łodzi (M_{t_teor1}, MJm^{-2}) i współczynników regresji dla Polski wg J. Podogrockiego (M_{t_teor2}, MJm^{-2}) od wartości rzeczywistych (M_{t_rzecz}, MJm^{-2}) w latach 1991–1998. Współczynnik transmisji promieniowania całkowitego dla wartości rzeczywistych (T_{t_r}) i teoretycznych wg Podogrockiego (T_{t_teor2})

Table 8.2.2. The deviations of the theoretical monthly sums of total solar radiation calculated for Łódź by means of Blacks' formula with the new regression coefficient for Łódź (M_{t_teor1}, MJm^{-2}) and the regression coefficient for Poland by Podogrocki (M_{t_teor2} , MJm^{-2}) from empirical values (M_{t_rzecz}, MJm^{-2}) in the period 1991–1998. The transmission coefficient of total solar radiation for the empirical (T_{t_r}) and the theoretical values by Podogrocki (T_{t_teor2})

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
M_{t_rzecz} T_{t_r}	72,66 0,30	125,46 0,34	277,67 0,41	404,46 0,42	565,29 0,45	589,48 0,44	594,82 0,45	506,5 0,46	306,78 0,39	180,57 0,36	78,68 0,28	53,59 0,27	3755,96 0,42
M_{t_teor1}	72,44	124,20	277,42	404,06	565,41	587,36	595,08	506,6	306,60	180,88	78,88	53,72	3752,65
M_{t_teor2} T_{t_teor2}	77,76 0,32	128,24 0,35	274,44 0,40	411,94 0,43	597,07 0,48	646,38 0,48	656,07 0,50	548,9 0,50	315,5 0,41	185,66 0,37	76,63 0,27	55,19 0,28	3973,78 0,44
$M_{t_teor1} - M_{t_rzecz}$	–0,2	–1,17	–0,25	–0,4	+0,12	–2,11	+0,26	–0,1	–0,18	+0,31	+0,21	+0,14	–3,31
$M_{t_teor2} - M_{t_rzecz}$ $T_{t_r} - T_{t_teor2}$	+5,11 –0,02	+2,81 –0,01	–3,22 +0,01	+7,49 –0,01	+31,78 –0,03	+56,90 –0,04	+61,25 –0,05	+42,4 –0,04	+8,72 –0,02	+5,09 –0,01	–2,04 –0,01	+1,61 –0,01	+217,82 –0,02

Tabela 8.2.3. Odchylenia względne (%) rzeczywistych sum miesięcznych i rocznych promieniowania całkowitego od wartości teoretycznych wg formuły Blacka z zastosowaniem współczynników regresji dla Łodzi (M_{t_teor1}) i dla Polski (wg Podogrockiego) (M_{t_teor2}). Błąd estymacji modelu regresji dla Łodzi w % (Sig_e)

Table 8.2.3. The relative deviations (%) of the empirical monthly and annual sums of total solar radiation from theoretical values calculated by means of Black's formula with the new regression coefficient for Łódź (M_{t_teor1}) and for Poland (by Podogrocki) (M_{t_teor2}). The estimation error of regression model for Łódź (in %) (Sig_e)

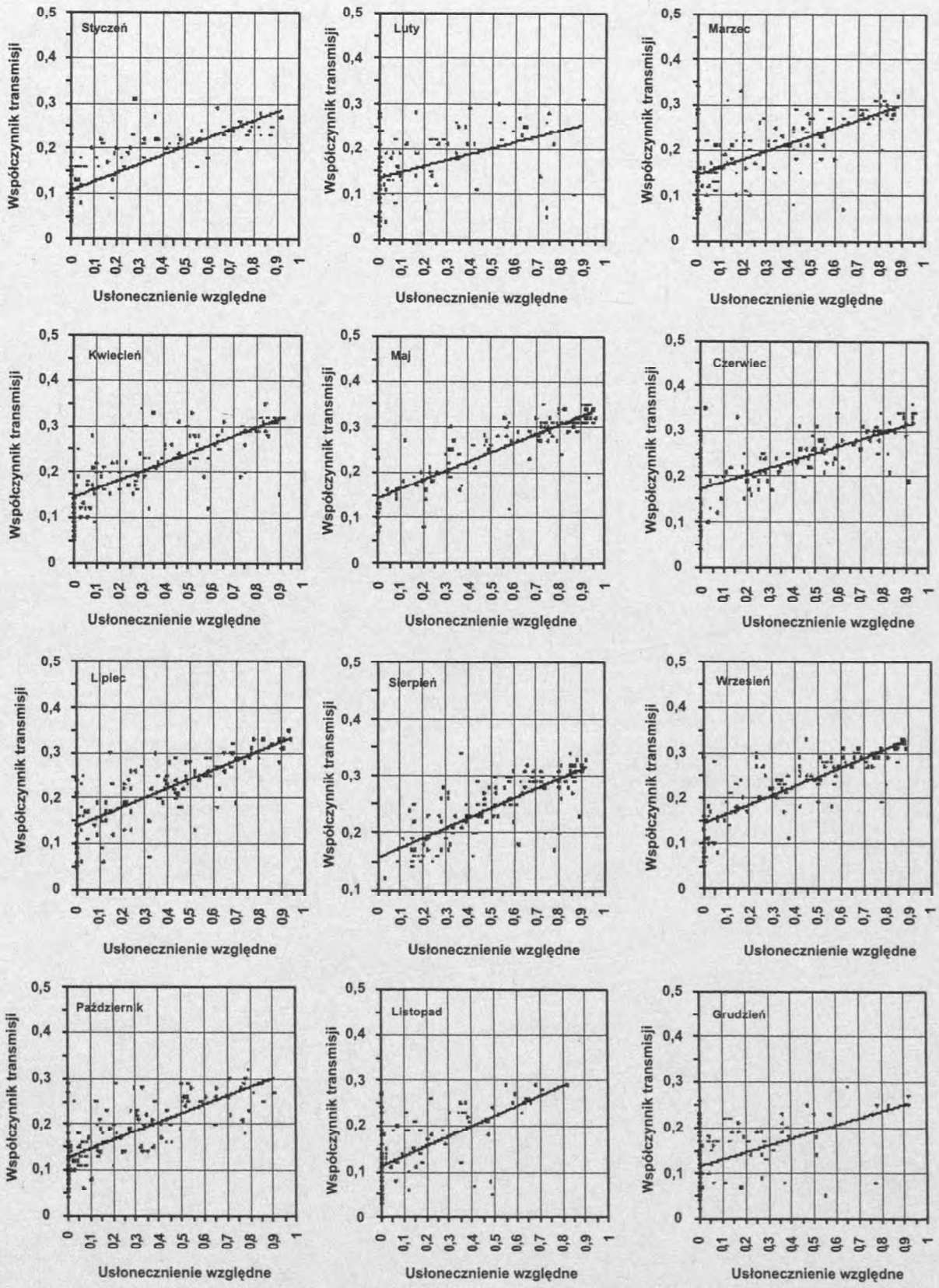
(%)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
M_{t_teor1}	0,3	0,9	0,09	0,1	0,02	0,3	0,04	0,02	0,06	0,2	0,3	0,3	0,08
M_{t_teor}	7,0	2,2	1,2	1,8	5,6	9,6	10,3	8,4	2,8	2,8	2,3	3,0	5,8
Sig_e	26	24	18	13	11	10	11	14	14	20	28	29	16

8.3. ZASTOSOWANIE FORMUŁY BLACKA DO SZACOWANIA SUM DOBOWYCH ULTRAFIOLETOWEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W ŁODZI

Wzorem badań przeprowadzonych w Kanadzie dla Edmonton (53°34'N, 113°34'W; Sadler 1992) w opracowaniu tym podjęto próbę wykorzystania formuły Blacka do wyznaczenia sum dobowych ultrafioletu (UVA + UVB, 290–400 nm) na podstawie wartości usłonecznienia względnego. W tym celu wykorzystano sumy dobowe promieniowania ultrafioletowego z centrum Łodzi (stacja Lipowa 51°45'N, 19°26'E) oraz dobowe wartości usłonecznienia względnego ze stacji Łódź-Lublinek (51°44'N, 19°24'E) z lat 1997–2000. Wartości sum dobowych ultrafioletu na górnej granicy atmosfery wyznaczono, przyjmując za Thekaekara (1971), że przedział spektralny promieniowania ultrafioletowego 290–400 nm stanowi 7,915% stałej słonecznej. Szczegółowy opis metodyczny przedstawiono w podrozdziale 3.3.

Rysunek 8.3.1 przedstawia wykresy rozrzutu wartości współczynnika ultrafioletu jako funkcji usłonecznienia względnego dla poszczególnych miesięcy. Najsilniejsza zależność liniowa cechuje maj, kiedy to współczynnik korelacji przekroczył 0,85. Współczynnik korelacji powyżej 0,80 charakteryzuje także lipiec, wrzesień i październik. Związek promieniowania ultrafioletowego i usłonecznienia względnego najmniejszą siłą cechuje się w lutym i grudniu, współczynniki korelacji wynoszą odpowiednio 0,44 i 0,53 (tab. 8.3.1). W maju zmienność promieniowania ultrafioletowego w 75% może być wyjaśniona zmiennością usłonecznienia względnego. Od lipca do października współczynnik determinacji przekracza 60%. Najniższa wartość współczynnika determinacji cechuje luty (20%) i grudzień (28%) (tab. 8.3.1).

Roczne wartości współczynników regresji *a* i *b* w formule Blacka do szacowania sum dobowych promieniowania ultrafioletowego w Łodzi wynoszą odpowiednio 0,133 i 0,197, podczas gdy dla Edmonton wartości te



Ryc. 8.3.1. Współczynnik transmisji promieniowania ultrafioletowego jako funkcja usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1997–2000

Fig. 8.3.1. The transmission coefficient of UV solar radiation as a function of relative solar radiation in Łódź in the period 1997–2000

wynoszą 0,152 i 0,186 (tab. 8.1.2). W przebiegu rocznym współczynnik *a* dla Łodzi osiąga najniższe wartości w miesiącach od października (0,115) do stycznia, kiedy to nie przekracza 0,107 (tab. 8.3.1). Najwyższa wartość współczynnika *a* charakteryzuje czerwiec, 0,176. Współczynnik *b* zmienia się w granicach od 0,132 w lutym do 0,220 w listopadzie (tab. 8.3.1). Błąd standardowy estymacji dobowych wartości współczynnika transmisji promieniowania ultrafioletowego na podstawie usłonecznienia względnego dla roku wynosi 23%. Najmniejszy błąd standardowy modelu regresji cechuje maj i sierpień (13 i 12%), a największy – luty, 41% (tab. 8.3.3).

Tabela 8.3.1. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) dla Łodzi do szacowania sum dobowych ultrafioletowego promieniowania słonecznego i ich charakterystyki statystyczne

Table 8.3.1. The values of regression coefficients (*a*, *b*) for Łódź to estimate the daily values of UV solar radiation and the statistical characteristics

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
a	0,107	0,136	0,145	0,143	0,143	0,172	0,137	0,156	0,143	0,127	0,112	0,115	0,133
b	0,194	0,132	0,173	0,193	0,202	0,156	0,207	0,174	0,206	0,193	0,220	0,150	0,197
**Sig a*	0,005	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,006	0,006	0,005	0,002
**Sig b*	0,015	0,025	0,017	0,015	0,010	0,014	0,013	0,013	0,014	0,015	0,024	0,021	0,005
***Sig*$_e$	0,047	0,066	0,054	0,049	0,036	0,051	0,044	0,035	0,043	0,047	0,055	0,053	0,055
R	0,758	0,455	0,669	0,768	0,868	0,702	0,803	0,780	0,810	0,753	0,660	0,535	0,745
R^2	0,575	0,207	0,445	0,589	0,752	0,493	0,645	0,608	0,660	0,567	0,436	0,286	0,555

* Błąd estymacji współczynników regresji.

** Błąd standardowy estymacji modelu regresji.

R – współczynnik korelacji istotny statystycznie na poziomie 5%, R^2 – współczynnik determinacji.

* Error of estimation of correlation coefficient.

** Standard error of estimation of regression model.

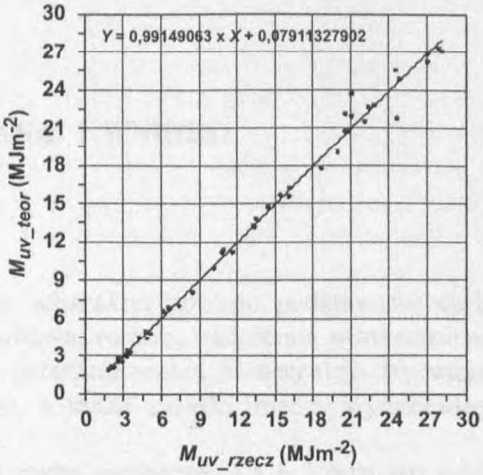
R – correlation coefficient significant on 5% level, R^2 – determination coefficient.

Współczynniki regresji do formuły Blacka wyznaczone na podstawie serii pomiarów ultrafioletu i usłonecznienia względnego w latach 1997–2000 wykorzystano do obliczenia teoretycznych sum dobowych, miesięcznych i rocznych promieniowania ultrafioletowego dla wymienionego okresu. Wyniki porównano z danymi doświadczalnymi. Przeciętne odchylenie danych teoretycznych od rzeczywistych dla sum rocznych energii promieniowania ultrafioletowego w latach 1997–2000 wynosi 0,2%. Bezwzględne wartości różnic pomiędzy teoretycznymi a doświadczalnymi sumami rocznymi ultrafioletu zawierają się w przedziale od + 0,57 MJm^{-2} (2000 r.) do –0,67 MJm^{-2} (1998 r.), tab. 8.3.2. Rycina 8.3.2 przedstawia liniową zależność korelacyjną teoretycznych i empirycznych sum miesięcznych ultrafioletu.

Tabela 8.3.2. Odchylenia sum miesięcznych promieniowania ultrafioletowego w Łodzi wyznaczonych wg formuły Blacka, M_{uv_teor} (MJm^{-2}), od wartości rzeczywistych, M_{uv_rzecz} (MJm^{-2}), w latach 1997–2000. Współczynnik transmisji ultrafioletu (T_{uv})

Table 8.3.2. The deviations of the theoretical monthly sums of UV solar radiation calculated for Łódź by means of Blacks' formula M_{uv_teor} (MJm^{-2}), from empirical values M_{uv_rzecz} (MJm^{-2}), in the period 1997–2000. The transmission coefficient of UV solar radiation (T_{uv})

	1997				1998				1999				2000			
	M_{uv_rzecz}	T_{uv}	M_{uv_teor}	teor–rzecz	M_{uv_rzecz}	T_{uv}	M_{uv_teor}	teor–rzecz	M_{uv_rzecz}	T_{uv}	M_{uv_teor}	teor–rzecz	M_{uv_rzecz}	T_{uv}	M_{uv_teor}	teor–rzecz
I	2,55	0,13	2,77	0,22	2,87	0,15	2,59	–0,28	3,26	0,17	3,01	–0,25	2,59	0,13	2,59	0,0
II	4,75	0,16	4,98	0,23	4,21	0,14	4,46	0,25	4,84	0,16	5,01	0,17	5,13	0,17	5,19	0,06
III	10,79	0,20	10,75	–0,04	11,62	0,22	11,2	–0,42	10,91	0,20	11,41	0,5	10,16	0,20	10,24	0,08
IV	16,12	0,21	16,26	0,14	15,41	0,20	15,12	–0,29	14,45	0,19	14,11	–0,34	18,68	0,25	18,1	–0,58
V	21,05	0,22	21,95	0,9	24,81	0,25	24,83	0,02	27,02	0,27	27,18	0,16	27,02	0,27	27,45	0,43
VI	24,63	0,23	23,15	–1,48	24,57	0,23	24,15	–0,42	21,07	0,20	21,18	0,11	27,86	0,26	28,12	0,26
VII	20,57	0,20	20,1	–0,47	22,86	0,22	22,8	–0,06	28,15	0,26	28,12	–0,03	19,96	0,19	20,01	0,05
VIII	22,41	0,25	22,62	0,21	20,58	0,23	20,79	0,21	20,84	0,23	20,72	–0,12	22,13	0,25	21,94	–0,19
IX	13,5	0,22	13,81	0,31	13,25	0,22	13,51	0,26	16,09	0,26	16,45	0,36	13,36	0,22	13,54	0,18
X	6,53	0,16	6,47	–0,06	6,15	0,15	6,0	–0,15	7,37	0,18	7,01	–0,36	8,48	0,21	8,56	0,08
XI	3,09	0,14	3,13	0,04	–	–	–	–	3,49	0,15	3,27	–0,22	3,32	0,15	3,42	0,1
XII	1,82	0,12	1,94	0,12	2,21	0,15	2,42	0,21	2,23	0,15	2,23	0,0	2,01	0,14	2,11	0,1
Rok	147,81	0,21	147,93	0,12	148,54	0,21	147,87	–0,67	159,72	0,22	159,7	–0,02	160,7	0,22	161,27	0,57



Ryc. 8.3.2. Zależność korelacyjna teoretycznych (M_{uv_teor}) i doświadczalnych (M_{uv_rzecz}) sum miesięcznych promieniowania ultrafioletowego w Łodzi w latach 1997–2000
Fig. 8.3.2. Correlation of the theoretical (M_{uv_teor}) and the empirical (M_{uv_rzecz}) monthly sums of UV solar radiation in Łódź in the period 1997–2000

Tabela 8.3.3. Błędy standardowe estymacji modelu regresji liniowej (w %) do szacowania sum energii ultrafioletu na podstawie usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1997–2000
Table 8.3.3. The estimation standard errors of the linear regression model (in %) apply to estimation of the UV energy sums on the basis of relative sunshine duration in Łódź in the period 1997–2000

(%)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Sig_e	27	41	25	23	13	21	18	12	18	20	33	36	23

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W opracowaniu scharakteryzowano podstawowe cechy solarne klimatu, m.in. zmienność dobową, roczną, wieloletnią usłonecznienia oraz całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego reprezentatywne dla Łodzi i regionu łódzkiego, a także związki między wymienionymi komponentami solarnymi klimatu.

Pierwszorzędną cechą usłonecznienia w Łodzi jest duża zmienność z dnia na dzień, z miesiąca na miesiąc, z roku na rok. Ogranicza to możliwości prognostyczne tego elementu klimatu oraz efektywne wykorzystanie w helioenergetyce czy helioterapii.

Wśród cech usłonecznienia w Łodzi na uwagę zasługuje występowanie zwartych okresów dni bezsłonecznych o największej frekwencji w okresie od listopada do lutego, potęgujących charakterystyczny dla tych miesięcy niedobór promieniowania słonecznego stwierdzony na podstawie kryterium bioklimatycznego (średnie dobowe usłonecznienie w okresie listopad – luty poniżej 4 godz.).

Generalną cechą wieloletniej zmienności usłonecznienia jest wzrost sum rocznych, sum sezonowych z wyjątkiem jesieni, sum miesięcznych z wyjątkiem marca, czerwca i września. W ciągu 50 lat pomiarów heliograficznych na stacji Łódź-Lublinek usłonecznienie wzrosło przeciętnie o 175 godzin. Za wzrost liczby godzin ze słońcem odpowiedzialna jest zwiększająca się grupa dni bardzo słonecznych, tj. z usłonecznieniem przewyższającym 75% możliwego oraz zmniejszająca się liczba dni bezsłonecznych. Szczególne nasilenie opisywanych tendencji ujawniających się na całym obszarze Polski wystąpiło w ostatniej dekadzie, tj. w latach 1991–2000.

Rozpatrując tendencje usłonecznienia w poszczególnych przedziałach godzinnych, warto zwrócić uwagę na fakt wzrostu czasu dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego przed zachodem Słońca, charakterystyczny dla wszystkich miesięcy, z maksimum latem. Najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem tej tendencji są zmiany struktury zachmurzenia spowodowane czynnikiem makrocyrkulacyjnym. Świadczy o tym odnotowany w latach 1951–2000 na stacji Łódź-Lublinek rosnący trend zachmurzenia konwekcyjnego i spadkowy trend zachmurzenia warstwowego w terminie

wieczornym, obserwowany także w innych regionach Polski i Europy Środkowej (Wibig 2004).

Poszukiwanie cykli dłuższych od roku w szeregach czasowych usłonecznienia w Łodzi ujawniło, iż dominujące oscylacje w widmach mocy poszczególnych miesięcy w większości przypadków nie są istotne statystycznie. Wyjątek stanowi pik okresowości 8,3 roku, przekraczający wartości krytyczne białego szumu na poziomie istotności 5%, pojawiający się w spektrum mocy sum usłonecznienia w styczniu, sierpniu i wrześniu oraz wahania 2,5, 2,8 i 3,8 roku ujawniające się odpowiednio w kwietniu, listopadzie i marcu. Wymienione periodyczności nie ujawniają się w widmach pozostałych miesięcy, co może świadczyć o przypadkowym charakterze tych wahań. Brak wyraźnych cech podobieństwa widma mocy dla miesięcy tej samej pory roku sugeruje wniosek o przypadkowości wykrytych periodyczności. W przypadku wahań krótszych wykryto istotną statystycznie periodyczność półroczną (182,5 dnia), ok. 3-miesięczną (91,25 dnia) i ok. 2,5-miesięczną (73 dni). Cykle półroczne i ok. 2,5-miesięczne w szeregach czasowych usłonecznienia są zbieżne z periodycznością pojawiającą się w szeregach sum opadów i prężności pary wodnej ujawniających się na obszarze Polski. Wahania te również wykryto w 5-letnich (lata 1997–2001) szeregach sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w Łodzi.

Typową dla Polski cechą solarną klimatu Łodzi jest nierównomierny dopływ całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w roku, o czym świadczy 80-procentowy udział okresu wiosenno-letniego w rocznej sumie energii promieniowania słonecznego. Jest to wynik uwarunkowań astronomicznych, meteorologicznych (zachmurzenie) i antropogenicznych (zanieczyszczenie atmosfery). Szeregi sum dobowych promieniowania całkowitego i UV wyróżnia duża zmienność wartości z dnia na dzień, z największym zakresem wahań latem. Nietypową cechą przebiegu rocznego sum energii (dobowych, miesięcznych) promieniowania całkowitego i UV jest występowanie najwyższych wartości w maju i pojawienie się drugorzędnego maksimum w sierpniu. Ten rozkład roczny sum energii promieniowania słonecznego nawiązuje do rozkładu usłonecznienia w ostatniej dekadzie, kiedy to wyraźnie w przebiegu helioizoplet zaznacza się depresja czerwcowa i dwie kulminacje wartości – w maju i sierpniu. Obniżenie dopływu promieniowania słonecznego w czerwcu i jego wzrost w maju i sierpniu dobrze ilustruje roczny przebieg globalnego współczynnika transmisji. Przeciętna roczna wartość współczynnika transmisji promieniowania całkowitego wynosi 41,4%, podczas gdy dla promieniowania UV współczynnik transmisji wynosi 21,8%. W maju wartości współczynnika transmisji wynoszą odpowiednio 50 i 26%, a w sierpniu 48 i 25%. Najniższe w roku wartości współczynnika transmisji promieniowania całkowitego i UV występują w grudniu, wynosząc odpowiednio 25 i 14%.

Analiza wpływu zachmurzenia na natężenie promieniowania słonecznego w Łodzi wykazała jego dwojaki charakter. Chmury mogą znacznie redukować (o 80–90%) natężenie promieniowania słonecznego, a także podwyższać jego wartość (o 10–20%), a procesy te są uwarunkowane m.in. budową chmur i ich lokalizacją względem tarczy słonecznej. Odbicie promieniowania słonecznego od bocznych części chmur konwekcyjnych, tzw. efekt lustrzany, może mieć większy wkład w promieniowanie całkowite rejestrowane przy powierzchni ziemi niż promieniowanie rozproszone pochodzące z bezchmurnego nieba.

Chmury warstwowe piętra niskiego silnie osłabiają natężenie promieniowania słonecznego, a transmisja promieniowania wyznaczona na podstawie porównania z wartościami rejestrowanymi w czasie pogody bezchmurnej jest przeciętnie o 10% większa dla ultrafioletu niż dla promieniowania całkowitego. Względnie większa transmisja promieniowania UV może być wyjaśniona tym, że w chmurach pochłaniane jest głównie promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni, a ultrafiolet podlega silniejszemu procesowi rozpraszania oraz odbicia na kryształkach lodu niż pozostałe długości fal. W wyniku tych procesów promieniowanie ultrafioletowe podlega względnie mniejszej ekstynkcji w chmurach niż promieniowania w całkowitym obszarze widma, o czym świadczy także wzrost udziału procentowego ultrafioletu od ok. 4% w warunkach bezchmurnego nieba do nawet powyżej 8% w dni pochmurne.

Związek ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego określa model regresji liniowej. Współczynniki regresji zmieniają się w przebiegu rocznym, gdzie współczynnik kierunkowy przyjmuje najniższe wartości w styczniu i grudniu, a najwyższe w lipcu, co jest efektem zmian zachmurzenia. Błędy standardowe estymacji sum dobowych ultrafioletu na podstawie sum dobowych promieniowania całkowitego zmieniają się od 3% dla maja, czerwca i lipca do 17% dla grudnia.

Badanie szeregów czasowych promieniowania całkowitego i UV w celu wykrycia cykliczności wykazało, że największy udział w wariancji mają wahania półroczne (182,5 dnia), ok. 4-miesięczne (121,7 dnia) i ok. 2,5-miesięczne (73 dni).

Analiza wpływu miasta na dopływ całkowitego promieniowania słonecznego wykazała, że roczne sumy energii w centrum Łodzi są przeciętnie niższe o 5% od sum energii rejestrowanych na stacji zamiejskiej. W okresie zimowym różnice te w odniesieniu do sum dobowych mogą wynosić 25% i więcej na niekorzyść centrum miasta. W przypadku dobowych sum energii promieniowania UV w 32% dni okresu pomiarowego zanotowano brak różnic między terenem zamiejskim i śródmiejskim, w 32% dni sumy dobowe ultrafioletu na stacji Łódź-Lublinek były wyższe niż sumy dobowe rejestrowane w centrum Łodzi, a w pozostałych dniach (36%) w centrum Łodzi

odnotowano wyższe dobowe sumy promieniowania ultrafioletowego niż na stacji zamiejskiej. Udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym był przeciętnie wyższy na stacji zamiejskiej o 0,2%. Hipotetycznym wyjaśnieniem przyczyny wzrostu udziału procentowego promieniowania UV jest większa prężność pary wodnej w terenie zamiejskim, wpływająca na redukcję fal promieniowania słonecznego głównie z zakresu bliskiej podczerwieni, a tym samym na względny wzrost natężenia ultrafioletu. Zweryfikowanie tej hipotezy wymaga analizy dłuższej serii pomiarowej.

Wynikiem analizy związku usłonecznienia z sumami energii całkowitego oraz ultrafioletowego promieniowania słonecznego są wyznaczone współczynniki regresji do formuły empirycznej Blacka. Współczynniki regresji cechuje zmienność roczna uwarunkowana zmianami zachmurzenia i przezroczystości atmosfery. Wzór Blacka z zastosowaniem obliczonych współczynników dla Łodzi pozwala oszacować na podstawie usłonecznienia względnego sumy dobowe promieniowania całkowitego z błędem w granicach 10% dla czerwca i 29% dla grudnia. Błąd szacunku sum dobowych ultrafioletu jest najmniejszy w maju i sierpniu (13 i 12%), a największy w lutym (41%). Porównanie wartości rzeczywistych promieniowania całkowitego w Łodzi w latach 1991–1998 z teoretycznymi obliczonymi formułą Blacka ze współczynnikami wyznaczonymi dla Łodzi oraz wzorem Blacka ze średnimi współczynnikami regresji dla Polski wg Podogrockiego nie wykazało istotnych różnic w odchyleniach, jakie dają obie formuły. Powyższe rezultaty pozwoliły na sformułowanie wniosku, iż model regresji liniowej wyznaczony na podstawie analizy łódzkiej serii pomiarowej nie różni się istotnie od modelu regresji dla Polski.

WYBRANE CHARAKTERYSTYKI SOLARNE KLIMATU ŁODZI. ZAŁĄCZNIK

Tabela I. Sumy miesięczne usłonecznienia rzeczywistego (godz.) w Łodzi w latach 1951–2000
Table I. The monthly totals of actual sunshine duration (in hour) in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	44,8	52,3	66,3	222,3	166,9	195,8	224,8	241,0	178,0	170,3	28,5	36,1	1627,1	1951
1952	36,3	22,8	149,8	171,4	177,3	189,0	257,3	176,7	105,0	15,5	7,6	23,2	1331,9	1952
1953	17,6	38,4	186,9	222,3	238,4	240,0	244,5	214,7	169,5	139,9	72,7	43,3	1828,2	1953
1954	45,2	97,2	74,3	104,2	197,6	217,6	129,2	226,9	150,0	113,2	50,1	8,3	1413,8	1954
1955	42,4	60,1	121,5	126,1	190,4	193,0	189,2	202,3	176,5	105,0	33,0	22,1	1461,6	1955
1956	37,5	52,6	143,6	81,4	196,4	161,0	211,1	149,7	189,2	94,3	63,6	44,0	1424,4	1956
1957	35,3	51,5	154,9	160,9	192,2	257,5	180,7	182,9	118,1	111,3	59,1	29,0	1533,4	1957
1958	46,1	58,3	67,5	85,5	182,8	196,7	235,0	211,3	165,2	83,4	19,7	40,7	1392,2	1958
1959	32,5	47,0	148,6	164,1	220,4	224,0	199,4	197,2	184,3	153,3	54,2	7,7	1632,7	1959
1960	26,8	101,0	183,0	120,6	195,1	150,8	122,3	156,8	157,5	94,8	42,4	35,5	1386,6	1960
1961	59,1	49,1	77,9	198,1	136,1	219,2	137,1	145,2	190,0	97,7	38,2	38,2	1385,9	1961
1962	48,1	19,4	102,7	147,1	107,2	207,2	194,1	139,0	132,4	129,2	30,3	18,4	1275,1	1962
1963	65,8	40,8	140,8	153,2	167,3	234,7	247,8	173,4	127,2	73,3	31,9	39,7	1495,9	1963
1964	69,4	84,4	100,9	169,7	241,4	221,4	224,0	154,3	178,8	105,0	19,4	19,6	1588,3	1964
1965	31,0	54,5	123,2	113,3	130,0	209,2	168,0	191,6	163,1	132,1	35,2	26,4	1377,6	1965
1966	18,7	47,6	70,7	135,3	180,3	244,4	188,0	226,0	154,1	104,6	29,2	28,2	1427,1	1966
1967	33,3	58,4	102,4	95,2	219,3	253,0	286,2	219,2	123,8	123,6	64,8	27,3	1606,5	1967
1968	20,2	42,7	129,8	178,7	167,4	265,3	236,9	252,6	153,4	69,0	41,6	51,9	1609,5	1968
1969	69,5	50,1	119,2	194,9	227,0	260,4	261,4	194,8	195,6	136,4	40,8	36,7	1786,8	1969
1970	26,2	53,1	76,5	118,1	220,3	287,4	214,6	216,2	164,4	63,7	38,2	14,1	1492,8	1970
1971	86,0	20,4	94,4	153,4	239,2	169,5	298,0	268,1	127,4	107,0	37,9	23,0	1624,3	1971
1972	56,6	58,9	156,4	109,8	160,2	185,6	242,6	162,3	116,0	91,1	40,0	96,5	1476,0	1972
1973	53,1	14,7	117,9	143,9	190,6	230,9	194,7	321,7	156,2	91,4	69,3	28,5	1612,9	1973
1974	30,5	93,6	172,3	204,1	175,2	177,8	131,8	208,9	167,4	47,7	42,5	28,8	1480,6	1974
1975	53,5	95,9	114,4	138,1	216,4	202,8	236,8	280,2	205,0	57,4	62,0	38,0	1700,5	1975
1976	38,3	133,0	78,5	171,0	251,4	301,4	289,5	241,9	120,7	96,9	27,3	30,1	1780,0	1976
1977	28,8	47,1	117,1	142,5	171,9	275,8	204,0	156,8	130,1	102,6	62,6	33,2	1472,5	1977
1978	54,6	54,9	115,3	148,0	236,1	248,4	230,8	174,2	87,3	78,9	54,7	37,2	1520,4	1978
1979	23,2	90,2	86,8	135,8	308,9	261,3	169,0	172,0	141,3	187,3	18,4	22,6	1616,8	1979
1980	62,2	34,1	109,0	147,2	247,2	167,2	98,0	148,7	137,6	75,0	28,5	32,4	1287,1	1980
1981	28,8	64,2	104,3	180,2	227,1	161,0	185,0	189,7	141,9	73,6	20,4	16,5	1392,7	1981
1982	63,7	85,0	150,0	152,4	270,6	229,5	302,6	270,9	184,1	142,7	59,1	10,8	1921,4	1982
1983	19,6	42,1	69,6	141,1	228,9	255,9	293,1	294,5	144,2	112,1	61,6	48,9	1711,6	1983
1984	38,3	62,0	105,5	154,3	136,5	169,3	178,4	275,9	92,4	98,9	77,3	27,5	1416,3	1984
1985	46,3	50,8	50,1	163,4	224,2	118,5	239,8	195,3	129,2	60,4	45,4	40,5	1363,9	1985
1986	29,4	73,8	121,0	152,4	273,4	273,7	238,5	190,2	102,0	149,2	77,3	41,9	1722,8	1986
1987	43,9	57,2	131,3	106,0	188,3	155,8	194,4	171,8	138,6	146,4	17,8	17,4	1368,9	1987
1988	45,9	58,2	84,3	226,7	235,0	185,2	261,3	235,0	102,2	160,4	75,8	13,8	1683,8	1988
1989	64,7	77,5	157,1	131,3	282,6	194,0	241,6	213,7	172,9	96,6	47,8	35,7	1715,5	1989
1990	48,4	103,9	140,5	127,9	299,0	211,5	209,9	242,7	97,7	167,0	16,4	42,5	1707,4	1990

Tabela I (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	83,0	61,8	93,9	167,9	191,7	206,4	263,4	209,5	197,6	151,7	47,3	36,9	1711,1	1991
1992	58,4	55,3	124,1	113,4	238,5	274,8	282,9	256,9	139,6	69,5	35,1	46,6	1695,1	1992
1993	64,3	49,4	98,7	193,2	257,2	189,8	211,5	223,3	121,5	101,3	31,5	27,2	1568,9	1993
1994	22,1	66,4	93,4	138,0	218,5	264,3	367,9	204,9	111,9	100,1	77,6	45,4	1710,5	1994
1995	48,6	60,4	104,3	138,4	222,9	213,7	331,0	260,5	88,3	123,6	53,1	56,4	1701,2	1995
1996	65,7	97,5	133,6	195,9	193,0	235,8	176,3	218,9	74,9	96,3	62,2	52,6	1602,7	1996
1997	51,1	73,2	138,2	91,7	194,6	114,9	184,3	273,5	152,5	78,1	35,1	18,2	1405,4	1997
1998	63,5	60,2	134,0	138,3	263,9	229,5	199,7	215,6	136,5	65,3	27,7	32,3	1566,5	1998
1999	69,7	30,9	133,0	117,2	298,4	173,1	299,3	214,2	204,0	86,9	45,4	39,2	1711,3	1999
2000	39,1	59,8	88,2	210,9	302,2	284,9	116,4	239,6	145,1	127,2	48,7	32,9	1695,0	2000
Max	86,0	133,0	186,9	226,7	308,9	301,4	367,9	321,7	205,0	187,3	77,6	96,5	1921,4	1951–2000
Min	17,6	14,7	50,1	81,4	107,2	114,9	98,0	139,0	74,9	15,5	7,6	7,7	1275,1	1951–2000
Średnia	45,7	60,3	115,2	149,9	213,9	215,8	220,5	212,1	144,8	105,2	44,1	32,9	1560,4	1951–2000

Tabela II. Sezonowe sumy usłonecznienia rzeczywistego (godz.) i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000
Table II. The seasonal totals of actual sunshine duration (in hour) and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000

Lata	Wiosna III–V (godz.)	Lato VI–VIII (godz.)	Jesień IX–XI (godz.)	Zima XII–II (godz.)	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1951	455,5	661,6	376,8	133,2	28,0	40,7	23,2	8,2	1951
1952	498,5	623,0	128,1	82,3	37,4	46,8	9,6	6,2	1952
1953	647,6	699,2	382,1	99,3	35,4	38,2	20,9	5,4	1953
1954	376,1	573,7	313,3	150,7	26,6	40,6	22,2	10,7	1954
1955	438,0	584,5	314,5	124,6	30,0	40,0	21,5	8,5	1955
1956	421,4	521,8	347,1	134,1	29,6	36,6	24,4	9,4	1956
1957	508,0	621,1	288,5	115,8	33,1	40,5	18,8	7,6	1957
1958	335,8	643,0	268,3	145,1	24,1	46,2	19,3	10,4	1958
1959	533,1	620,6	391,8	87,2	32,7	38,0	24,0	5,3	1959
1960	498,7	429,9	294,7	163,3	36,0	31,0	21,3	11,8	1960
1961	412,1	501,5	325,9	146,4	29,7	36,2	23,5	10,6	1961
1962	357,0	540,3	291,9	85,9	28,0	42,4	22,9	6,7	1962
1963	461,3	655,9	232,4	146,3	30,8	43,8	15,5	9,8	1963
1964	512,0	599,7	303,2	173,4	32,2	37,8	19,1	10,9	1964
1965	366,5	568,8	330,4	111,9	26,6	41,3	24,0	8,1	1965
1966	386,3	658,4	287,9	94,5	27,1	46,1	20,2	6,6	1966
1967	416,9	758,4	312,2	119,0	26,0	47,2	19,4	7,4	1967
1968	475,9	754,8	264,0	114,8	29,6	46,9	16,4	7,1	1968

Tabela II (cd.)

Lata	Wiosna III–V (godz.)	Lato VI–VIII (godz.)	Jesień IX–XI (godz.)	Zima XII–II (godz.)	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1969	541,1	716,6	372,8	156,3	30,3	40,1	20,9	8,7	1969
1970	414,9	718,2	266,3	93,4	27,8	48,1	17,8	6,3	1970
1971	487,0	735,6	272,3	129,4	30,0	45,3	16,8	8,0	1971
1972	426,4	590,5	247,1	212,0	28,9	40,0	16,7	14,4	1972
1973	452,4	747,3	316,9	96,3	28,0	46,3	19,6	6,0	1973
1974	551,6	518,5	257,6	152,9	37,3	35,0	17,4	10,3	1974
1975	468,9	719,8	324,4	187,4	27,6	42,3	19,1	11,0	1975
1976	500,9	832,8	244,9	201,4	28,1	46,8	13,8	11,3	1976
1977	431,5	636,6	295,3	109,1	29,3	43,2	20,1	7,4	1977
1978	499,4	653,4	220,9	146,7	32,8	43,0	14,5	9,6	1978
1979	531,5	602,3	347,0	136,0	32,9	37,3	21,5	8,4	1979
1980	503,4	413,9	241,1	128,7	39,1	32,2	18,7	10,0	1980
1981	511,6	535,7	235,9	109,5	36,7	38,5	16,9	7,9	1981
1982	573,0	803,0	385,9	159,5	29,8	41,8	20,1	8,3	1982
1983	439,6	843,5	317,9	110,6	25,7	49,3	18,6	6,5	1983
1984	396,3	623,6	268,6	127,8	28,0	44,0	19,0	9,0	1984
1985	437,7	553,6	235,0	137,6	32,1	40,6	17,2	10,1	1985
1986	546,8	702,4	328,5	145,1	31,7	40,8	19,1	8,4	1986
1987	425,6	522,0	302,8	118,5	31,1	38,1	22,1	8,7	1987
1988	546,0	681,5	338,4	117,9	32,4	40,5	20,1	7,0	1988
1989	571,0	649,3	317,3	177,9	33,3	37,8	18,5	10,4	1989
1990	567,4	664,1	281,1	194,8	33,2	38,9	16,5	11,4	1990
1991	453,5	679,3	396,6	181,7	26,5	39,7	23,2	10,6	1991
1992	476,0	814,6	244,2	160,3	28,1	48,1	14,4	9,5	1992
1993	549,1	624,6	254,3	140,9	35,0	39,8	16,2	9,0	1993
1994	449,9	837,1	289,6	133,9	26,3	48,9	16,9	7,8	1994
1995	465,6	805,2	265,0	165,4	27,4	47,3	15,6	9,7	1995
1996	522,5	631,0	233,4	215,8	32,6	39,4	14,6	13,5	1996
1997	424,5	572,7	265,7	142,5	30,2	40,7	18,9	10,1	1997
1998	536,2	644,8	229,5	156,0	34,2	41,2	14,7	10,0	1998
1999	548,6	686,6	336,3	139,8	32,1	40,1	19,7	8,2	1999
2000	601,3	640,9	321,0	131,8	35,5	37,8	18,9	7,8	2000
Max	647,6	843,5	396,6	215,8	39,1	49,3	24,4	14,4	1951–2000
Min	335,8	413,9	128,1	82,3	24,1	31,0	9,6	5,3	1951–2000
Średnia	479,0	648,3	294,1	138,9	30,7	41,5	18,9	8,9	1951–2000

Tabela III. Sumy dobowe usłonecznienia rzeczywistego (godz.) w Łodzi w latach 1951–2000
Table III. The daily totals of actual sunshine duration (in hour) in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1969	2,2	1,8	3,8	6,5	7,3	8,7	8,4	6,3	6,5	4,2	1,4	1,2	4,9	1969
1951	1,4	1,9	2,1	7,4	5,4	6,5	7,3	7,8	5,9	5,5	0,9	1,2	4,4	1951
1952	1,2	0,8	4,8	5,7	5,7	6,4	9,5	6,7	3,6	0,6	0,3	0,7	3,8	1952
1953	0,6	1,4	6,0	7,4	7,7	8,0	7,9	6,9	5,6	4,5	2,4	1,4	5,0	1953
1954	1,5	3,5	2,4	3,5	6,4	7,3	4,2	7,3	5,0	3,7	1,7	0,3	3,9	1954
1955	1,4	2,1	3,9	4,2	6,1	6,4	6,1	6,5	5,9	3,4	1,1	0,7	4,0	1955
1956	1,2	1,8	4,6	2,7	6,3	5,4	6,8	4,8	6,3	3,0	2,1	1,4	3,9	1956
1957	1,1	1,8	5,0	5,4	6,2	8,6	5,8	5,9	3,9	3,6	2,0	0,9	4,2	1957
1958	1,5	2,1	2,2	2,8	5,9	6,6	7,6	6,8	5,5	2,7	0,7	1,3	3,8	1958
1959	1,2	1,7	4,8	5,5	7,1	7,5	6,4	6,4	6,1	4,9	1,8	0,2	4,5	1959
1960	0,9	3,5	5,9	4,0	6,3	5,0	3,9	5,1	5,2	3,1	1,4	1,1	3,8	1960
1961	1,9	1,8	2,5	6,6	4,4	7,3	4,4	4,7	6,3	3,2	1,3	1,2	3,8	1961
1962	1,6	0,7	3,3	4,9	3,5	6,9	6,3	4,5	4,4	4,2	1,0	0,6	3,5	1962
1963	2,1	1,5	4,5	5,1	5,8	7,8	8,2	5,6	4,2	2,4	1,1	1,4	4,1	1963
1964	2,2	2,9	3,3	5,7	7,8	7,4	7,2	5,0	6,0	3,4	0,6	0,6	4,3	1964
1965	1,0	1,9	4,0	3,8	4,2	7,0	5,4	6,2	5,4	4,3	1,2	0,9	3,8	1965
1966	0,6	1,7	2,3	4,5	5,8	8,1	6,1	7,3	5,1	3,4	1,0	0,9	3,9	1966
1967	1,1	2,1	3,3	3,2	7,1	8,4	9,2	7,1	4,1	4,0	2,2	0,9	4,4	1967
1968	0,7	1,5	4,2	6,0	5,4	8,8	7,6	8,1	5,1	2,2	1,4	1,7	4,4	1968
1969	2,2	1,8	3,8	6,5	7,3	8,7	8,4	6,3	6,5	4,2	1,4	1,2	4,9	1968

1970	0,8	1,9	2,5	3,9	7,1	9,6	6,9	7,0	5,5	2,1	1,3	0,5	4,1	1970
1971	2,8	0,7	3,0	5,1	7,7	5,6	9,6	8,6	4,2	3,5	1,3	0,7	4,4	1971
1972	1,8	2,0	5,0	3,7	5,2	6,2	7,8	5,2	3,9	2,9	1,3	3,1	4,0	1972
1973	1,7	0,5	3,8	4,8	6,1	7,7	6,3	10,4	5,2	2,9	2,3	0,9	4,4	1973
1974	1,0	3,3	5,6	6,8	5,7	5,9	4,3	6,7	5,6	1,5	1,4	0,9	4,1	1974
1975	1,7	3,4	3,7	4,6	7,0	6,8	7,6	9,0	6,8	1,9	2,1	1,2	4,7	1975
1976	1,2	4,6	2,5	5,7	8,4	10,0	9,3	7,8	4,0	3,1	0,9	1,0	4,9	1976
1977	0,9	1,7	3,8	4,7	5,5	9,2	6,6	5,1	4,3	3,3	2,1	1,1	4,0	1977
1978	1,8	2,0	3,7	4,9	7,6	8,3	7,4	5,6	2,9	2,5	1,8	1,2	4,1	1978
1979	0,7	3,2	2,8	4,5	10,0	8,7	5,5	5,5	4,7	6,0	0,6	0,7	4,4	1979
1980	2,0	1,2	3,5	4,9	8,0	5,6	3,2	4,8	4,6	2,4	0,9	1,0	3,5	1980
1981	0,9	2,3	3,4	6,0	7,3	5,4	6,0	6,1	4,7	2,4	0,7	0,5	3,8	1981
1982	2,1	3,0	4,8	5,1	8,7	7,6	9,8	8,7	6,1	4,6	2,0	0,3	5,2	1982
1983	0,6	1,5	2,2	4,7	7,4	8,5	9,5	9,5	4,8	3,6	2,1	1,6	4,7	1983
1984	1,2	2,1	3,4	5,1	4,4	5,6	5,8	8,9	3,1	3,2	2,6	0,9	3,9	1984
1985	1,5	1,8	1,6	5,4	7,2	3,9	7,7	6,3	4,3	1,9	1,5	1,3	3,7	1985
1986	0,9	2,6	3,9	5,1	8,8	9,1	7,7	6,1	3,4	4,8	2,6	1,4	4,7	1986
1987	1,4	2,0	4,2	3,5	6,1	5,2	6,3	6,5	4,6	4,7	0,6	0,6	3,8	1987
1988	1,5	2,0	2,7	7,6	7,6	6,2	8,4	7,6	3,4	5,2	2,5	0,4	4,6	1988
1989	2,1	2,8	5,1	4,4	9,1	6,5	7,8	6,9	5,8	3,1	1,6	1,2	4,7	1989
1990	1,6	3,7	4,5	4,3	9,6	7,0	6,8	7,8	3,3	5,4	0,5	1,4	4,7	1990

Tabela III (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	2,7	2,2	3,0	5,6	6,2	6,9	8,5	6,8	6,6	4,9	1,6	1,2	4,7	1991
1992	1,9	1,9	4,0	3,8	7,7	9,2	9,1	8,3	4,7	2,2	1,2	1,5	4,6	1992
1993	2,1	1,8	3,2	6,4	8,3	6,3	6,8	7,2	4,1	3,3	1,1	0,9	4,3	1993
1994	0,7	2,4	3,0	4,6	7,0	8,8	11,9	6,6	3,7	3,2	2,6	1,5	4,7	1994
1995	1,6	2,2	3,4	4,6	7,2	7,1	10,7	8,4	2,9	4,0	1,8	1,8	4,6	1995
1996	2,1	3,4	4,3	6,5	6,2	7,9	5,7	7,1	2,5	3,1	2,1	1,7	4,4	1996
1997	1,6	2,6	4,5	5,3	6,3	3,8	5,9	8,8	5,1	2,5	1,2	0,6	4,0	1997
1998	2,0	2,2	4,3	4,6	8,5	7,7	6,4	7,0	4,6	2,1	0,9	1,0	4,3	1998
1999	2,2	1,1	4,3	3,9	9,6	5,8	9,7	6,9	6,8	2,8	1,5	1,3	4,7	1999
2000	1,3	2,1	2,8	7,0	9,7	9,5	3,8	7,7	4,8	4,1	1,6	1,1	4,6	2000
Max	2,8	4,6	6,0	7,6	10,0	10,0	11,9	10,4	6,8	6,0	2,6	3,1	5,2	1951–2000
Min	0,6	0,5	1,6	2,7	3,5	3,8	3,2	4,5	2,5	0,6	0,3	0,2	3,5	1951–2000
Średnia	1,5	2,1	3,7	5,0	6,9	7,2	7,1	6,9	4,8	3,4	1,5	1,1	4,3	1951–2000

Tabela IV. Usłonecznienie względne w Łodzi w latach 1951–2000
Table IV. The relative sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	17	19	18	53	34	39	45	53	47	51	11	15	36	1951
1952	14	8	41	41	37	38	51	39	28	5	3	9	30	1952
1953	7	14	51	53	49	48	49	47	45	42	27	18	41	1953
1954	17	35	20	25	41	44	26	50	39	34	19	3	32	1954
1955	16	22	33	30	39	39	38	45	46	32	12	9	33	1955
1956	14	19	39	20	40	32	42	33	50	28	24	18	32	1956
1957	14	18	42	39	40	52	36	40	31	34	22	12	34	1957
1958	18	21	18	21	38	39	47	47	43	25	7	17	31	1958
1959	12	17	40	39	45	45	40	44	48	46	20	3	36	1959
1960	10	36	50	29	40	30	24	35	41	29	16	15	31	1960
1961	23	18	21	48	28	44	27	32	50	29	14	16	31	1961
1962	18	7	28	35	22	42	39	31	35	39	11	8	28	1962
1963	25	15	38	37	34	47	49	38	33	22	12	16	33	1963
1964	27	30	27	41	50	44	45	34	47	32	7	8	35	1964
1965	12	20	33	27	27	42	34	42	43	40	13	11	31	1965
1966	7	17	19	33	37	49	38	50	40	32	11	12	32	1966
1967	13	21	28	23	45	51	57	48	33	37	24	11	36	1967
1968	8	15	35	43	34	53	47	56	40	21	16	21	36	1968

Tabela IV (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1969	27	18	32	47	47	52	52	43	51	41	15	15	40	1969
1970	10	19	21	28	45	58	43	48	43	19	14	6	33	1970
1971	33	7	26	37	49	34	59	59	33	32	14	9	36	1971
1972	22	21	43	26	33	37	48	36	30	27	15	39	33	1972
1973	20	5	32	35	39	46	39	71	41	28	26	12	36	1973
1974	12	34	47	49	36	36	26	46	44	14	16	12	33	1974
1975	21	34	31	33	45	41	47	62	54	17	23	16	38	1975
1976	15	48	21	41	52	60	58	53	32	29	10	12	40	1976
1977	11	17	32	34	35	55	41	35	34	31	23	14	33	1977
1978	21	20	31	36	49	50	46	38	23	24	21	15	34	1978
1979	9	32	24	33	64	52	34	38	37	56	7	9	36	1979
1980	24	12	30	35	51	34	20	33	36	23	11	13	29	1980
1981	11	23	28	43	47	32	37	42	37	22	8	7	31	1981
1982	24	30	41	37	56	46	60	60	48	43	22	4	43	1982
1983	8	15	19	34	47	51	59	65	38	34	23	20	38	1983
1984	15	22	29	37	28	34	36	61	24	30	29	11	32	1984
1985	18	18	14	39	46	24	48	43	34	18	17	17	30	1985
1986	11	26	33	37	56	55	48	42	27	45	29	17	38	1986
1987	17	20	36	25	39	31	39	38	36	44	7	7	31	1987
1988	18	21	23	54	48	37	52	52	27	48	28	6	38	1988
1989	25	28	43	32	58	39	48	47	45	29	18	15	38	1989
1990	19	37	38	31	62	42	42	54	26	50	6	17	38	1990
1991	32	22	26	40	40	41	53	46	52	46	18	15	38	1991
1992	22	20	34	27	49	55	56	57	37	21	13	19	38	1992
1993	25	18	27	46	53	38	42	49	32	31	12	11	35	1993
1994	8	24	25	33	45	53	73	45	29	30	29	19	38	1994
1995	19	22	28	33	46	43	66	58	23	37	20	23	38	1995
1996	25	35	36	47	40	47	35	48	20	29	23	21	36	1996
1997	20	26	38	22	40	23	37	60	40	24	13	7	31	1997
1998	24	22	36	33	54	46	40	48	36	20	10	13	35	1998
1999	27	11	36	28	61	35	60	47	54	26	17	16	38	1999
2000	15	21	24	51	62	57	23	53	38	38	18	13	38	2000
Max	33	48	51	54	64	60	73	71	54	56	29	39	43	1951–2000
Min	7	5	14	20	22	23	20	31	20	5	3	3	28	1951–2000
Średnia	18	22	31	36	44	43	44	47	38	32	17	13	35	1951–2000

Tabela V. Miesięczna i roczna liczba dni bezsłonecznych w Łodzi w latach 1951–2000
Table V. The monthly and the annual number of sunless days in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	14	12	11	4	4	1	4	1	1	2	15	17	86	1951
1952	16	20	5	6	2	2	2	0	4	14	22	20	113	1952
1953	22	15	2	0	1	0	0	1	2	4	13	20	80	1953
1954	15	9	13	8	3	3	4	1	2	5	8	20	91	1954
1955	17	4	5	7	2	1	1	0	2	8	16	16	79	1955
1956	15	12	6	5	6	5	3	4	2	11	10	17	96	1956
1957	21	11	1	4	6	0	6	0	5	7	13	17	91	1957
1958	16	9	12	7	0	1	0	2	5	7	22	14	95	1958
1959	16	12	7	4	1	2	0	1	1	3	13	25	85	1959
1960	19	5	6	5	2	2	9	1	0	6	11	19	85	1960
1961	10	11	7	1	1	1	2	0	3	5	17	15	73	1961
1962	15	10	8	3	5	2	0	1	4	6	19	21	94	1962
1963	10	16	9	7	3	0	2	5	4	9	11	18	94	1963
1964	12	10	13	7	0	2	1	4	3	8	20	22	102	1964
1965	21	8	6	6	7	3	1	4	2	6	20	15	99	1965
1966	20	14	8	3	7	1	2	3	2	12	20	16	108	1966
1967	19	11	4	7	6	3	1	0	3	3	12	20	89	1967
1968	17	14	4	7	2	4	2	0	5	9	19	17	100	1968
1969	13	10	8	1	2	3	2	6	3	5	15	21	89	1969
1970	22	12	11	6	1	0	3	2	1	11	16	23	108	1970
1971	12	21	10	4	2	4	1	1	5	7	17	20	104	1971
1972	19	14	5	10	4	2	3	3	6	5	11	9	91	1972
1973	19	18	9	2	3	3	2	0	3	11	11	19	100	1973
1974	16	7	3	2	6	4	3	1	3	13	13	20	91	1974
1975	16	9	7	5	3	2	4	1	3	13	13	17	93	1975
1976	18	8	8	3	4	1	2	1	5	10	20	19	99	1976
1977	18	12	4	7	7	1	2	4	8	9	9	22	103	1977
1978	16	11	4	5	4	1	2	2	7	14	17	18	101	1978
1979	21	11	7	6	1	1	1	2	5	2	21	20	98	1979
1980	16	18	8	7	2	4	2	2	4	10	17	22	112	1980
1981	16	13	9	5	2	5	5	3	4	10	20	21	113	1981
1982	16	10	6	2	3	2	1	1	2	1	11	24	79	1982
1983	20	16	12	3	2	4	1	1	1	5	12	16	93	1983
1984	19	13	9	5	5	1	3	0	9	6	9	19	98	1984
1985	17	10	15	3	3	6	0	8	2	14	13	21	112	1985
1986	17	12	9	3	1	1	3	1	4	4	6	18	79	1986
1987	21	12	4	7	3	2	2	1	2	9	18	22	103	1987
1988	16	10	4	1	6	4	0	1	5	4	8	23	82	1988
1989	10	5	2	9	0	2	0	2	2	5	13	15	65	1989
1990	17	4	7	3	0	1	3	1	4	5	19	18	82	1990

Tabela V (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	12	12	6	2	5	0	0	1	2	6	15	19	80	1991
1992	13	13	6	4	3	2	2	0	5	8	15	16	87	1992
1993	11	16	8	6	2	4	0	0	4	10	21	18	100	1993
1994	16	10	6	5	1	1	1	3	5	9	11	12	80	1994
1995	11	10	6	1	4	2	0	3	11	7	13	13	81	1995
1996	14	12	7	5	1	3	3	3	11	9	12	17	97	1996
1997	18	9	4	1	5	16	5	2	1	7	18	24	110	1997
1998	10	14	3	6	1	3	3	0	5	11	19	15	90	1998
1999	9	13	5	8	0	7	2	0	1	7	13	13	78	1999
2000	19	8	7	0	1	0	3	0	4	3	12	18	75	2000
Max	22	21	15	10	7	16	9	8	11	14	22	25	113	1951–2000
Min	9	4	1	0	0	0	0	0	0	1	6	9	65	1951–2000
Średnia	16	12	7	5	3	2	2	2	4	7	15	18	93	1951–2000

Tabela VI. Sezonowa liczba dni bezsłonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000
Table VI. The seasonal number of sunless days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1951	19	6	18	43	22	7	21	50	1951
1952	13	4	40	57	11	4	35	50	1952
1953	3	1	19	57	4	1	24	71	1953
1954	24	8	15	43	27	9	17	48	1954
1955	14	2	26	37	18	3	33	47	1955
1956	17	12	23	45	18	12	24	46	1956
1957	11	6	25	49	12	7	27	54	1957
1958	19	3	34	39	20	3	36	41	1958
1959	12	3	17	53	14	4	20	62	1959
1960	13	12	17	44	15	14	20	51	1960
1961	9	3	25	36	12	4	34	49	1961
1962	16	3	29	46	17	3	31	49	1962
1963	19	7	24	44	20	7	26	47	1963
1964	20	7	30	45	20	7	29	44	1964
1965	17	8	28	44	18	8	29	45	1965
1966	17	5	33	50	16	5	31	48	1966
1967	16	4	18	49	18	5	21	56	1967
1968	12	5	32	47	13	5	33	49	1968

Tabela VI (cd.)

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1969	11	10	22	44	13	11	25	51	1969
1970	16	5	28	57	15	5	26	54	1970
1971	16	6	29	53	15	6	28	51	1971
1972	19	8	22	43	21	9	24	47	1972
1973	14	5	25	56	14	5	25	56	1973
1974	13	4	29	51	13	4	30	53	1974
1975	15	7	29	42	16	8	31	45	1975
1976	15	4	35	45	15	4	35	45	1976
1977	18	7	26	52	17	7	25	50	1977
1978	13	5	38	45	13	5	38	45	1978
1979	13	4	29	51	13	4	30	53	1979
1980	16	8	31	56	14	7	28	50	1980
1981	16	13	34	50	14	12	30	44	1981
1982	11	4	14	50	14	5	18	63	1982
1983	17	6	18	52	18	6	19	56	1983
1984	19	4	24	52	19	4	24	53	1984
1985	21	14	29	48	19	13	26	43	1985
1986	13	5	14	47	16	6	18	59	1986
1987	14	5	29	55	14	5	28	53	1987
1988	11	5	17	50	13	6	20	60	1988
1989	11	4	20	30	17	6	31	46	1989
1990	10	5	28	39	12	6	34	48	1990
1991	11	1	23	43	14	1	29	55	1991
1992	13	4	28	43	15	5	32	49	1992
1993	16	4	35	45	16	4	35	45	1993
1994	12	5	25	38	15	6	31	48	1994
1995	11	5	31	34	14	6	38	42	1995
1996	13	9	32	43	13	9	33	44	1996
1997	10	23	26	51	9	21	24	46	1997
1998	10	6	35	39	11	7	39	43	1998
1999	13	9	21	35	17	12	27	45	1999
2000	8	3	19	46	11	4	25	61	2000
Max	24	23	40	57	27	21	39	71	1951–2000
Min	3	1	14	30	4	1	17	41	1951–2000
Średnia	14	6	26	46	15	7	28	50	1951–2000

Tabela VII. Miesięczna i roczna liczba dni umiarkowanie słonecznych (25,1–50% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000
Table VII. The monthly and the annual number of moderately sunny days (25.1–50% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	1	6	7	7	7	13	8	6	8	4	4	6	77	1951
1952	7	1	7	3	9	10	7	8	10	2	1	3	68	1952
1953	2	5	8	5	7	10	12	8	9	8	2	4	80	1953
1954	4	4	4	9	11	7	6	7	12	7	10	1	82	1954
1955	5	8	11	7	8	12	12	9	6	5	4	2	89	1955
1956	4	6	6	8	8	14	14	12	5	5	3	3	88	1956
1957	2	5	4	9	7	5	4	8	9	12	3	5	73	1957
1958	8	5	5	5	9	8	12	9	4	7	2	5	79	1958
1959	2	3	7	7	10	6	8	10	11	5	6	2	77	1959
1960	3	9	2	7	9	11	9	7	8	7	2	4	78	1960
1961	4	5	7	4	10	8	8	8	2	8	2	3	69	1961
1962	7	1	4	6	8	6	9	9	6	8	5	2	71	1962
1963	8	6	7	8	14	10	7	11	4	10	1	3	89	1963
1964	8	7	4	5	13	6	5	5	8	3	1	2	67	1964
1965	1	2	9	5	1	8	9	6	9	4	3	3	60	1965
1966	3	4	6	5	6	0	4	6	7	5	5	5	56	1966
1967	3	6	10	7	4	5	3	12	6	4	3	0	63	1967
1968	3	6	8	6	10	3	5	8	3	9	1	2	64	1968
1969	13	10	8	1	2	3	2	6	3	5	15	21	89	1969
1970	5	2	8	12	7	4	7	4	10	3	2	1	65	1970
1971	5	1	5	5	10	6	2	4	12	5	5	1	61	1971
1972	1	6	7	7	7	7	8	9	7	5	5	4	73	1972
1973	2	2	5	10	10	8	13	3	4	3	3	4	67	1973
1974	3	5	6	7	5	7	10	6	9	5	1	2	66	1974
1975	4	2	11	4	8	10	5	8	5	5	4	2	68	1975
1976	2	3	6	4	4	4	6	9	7	5	3	5	58	1976
1977	3	9	8	10	6	6	6	9	6	1	6	1	71	1977
1978	4	8	10	9	6	8	7	14	5	3	3	3	80	1978
1979	1	5	7	4	7	7	7	8	5	5	1	2	59	1979
1980	4	2	6	5	9	3	8	9	9	9	5	0	69	1980
1981	3	3	7	7	7	9	9	6	7	4	1	2	65	1981
1982	1	8	4	4	4	11	6	3	7	10	2	1	61	1982
1983	2	2	6	9	8	6	6	6	8	6	7	3	69	1983
1984	7	1	4	9	12	8	10	10	6	7	1	2	77	1984
1985	2	6	4	6	4	8	7	5	11	4	8	4	69	1985
1986	3	5	6	6	7	7	10	6	6	5	9	3	73	1986
1987	3	1	8	9	5	15	7	9	8	1	3	2	71	1987
1988	3	6	12	6	5	5	10	6	8	5	1	0	67	1988
1989	5	7	8	5	5	8	4	5	4	2	7	2	62	1989
1990	5	3	10	11	6	6	11	6	12	3	1	2	76	1990

Tabela VII (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	6	6	7	8	7	15	5	7	7	9	4	2	83	1991
1992	6	4	6	11	9	7	4	9	4	8	5	1	74	1992
1993	2	4	4	4	7	4	10	11	10	7	3	5	71	1993
1994	5	4	4	7	14	6	2	3	10	9	2	5	71	1994
1995	5	3	5	8	8	4	3	5	6	7	4	5	63	1995
1996	2	3	6	4	6	5	9	7	7	5	6	3	63	1996
1997	4	4	9	10	5	3	6	4	6	9	1	1	62	1997
1998	7	3	8	4	5	10	8	10	8	3	1	4	71	1998
1999	3	4	5	6	7	6	4	12	5	7	5	5	69	1999
2000	2	7	6	6	6	8	10	9	9	6	10	5	84	2000
Max	8	9	12	12	14	15	14	14	12	12	10	6	89	1951–2000
Min	1	1	2	3	1	0	2	3	2	1	1	0	56	1951–2000
Średnia	4	4	7	7	8	7	7	8	7	6	4	3	71	1951–2000

Tabela VIII. Sezonowa liczba dni umiarkowanie słonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000
Table VIII. The seasonal number of moderately sunny days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1951	21	27	16	13	27	35	21	17	1951
1952	19	25	13	11	28	37	17	14	1952
1953	20	30	19	11	25	38	25	14	1953
1954	24	20	29	9	29	24	38	12	1954
1955	26	33	15	15	29	37	19	19	1955
1956	22	40	13	13	25	45	17	17	1956
1957	20	17	24	12	27	23	31	16	1957
1958	19	29	13	18	24	37	17	23	1958
1959	24	24	22	7	31	31	29	9	1959
1960	18	27	17	16	23	35	22	21	1960
1961	21	24	12	12	30	35	16	16	1961
1962	18	24	19	10	25	34	25	13	1962
1963	29	28	15	17	33	31	19	22	1963
1964	22	16	12	17	33	24	16	22	1964
1965	15	23	16	6	25	38	21	8	1965
1966	17	10	17	12	30	18	22	16	1966
1967	21	20	13	9	33	32	17	12	1967
1968	24	16	13	11	38	25	17	14	1968

Tabela VIII (cd.)

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1969	20	20	19	10	29	29	25	13	1969
1970	27	15	15	8	42	23	19	10	1970
1971	20	12	22	7	33	20	29	9	1971
1972	21	24	17	11	29	33	22	14	1972
1973	25	24	10	8	37	36	13	10	1973
1974	18	23	15	10	27	35	19	13	1974
1975	23	23	14	8	34	34	18	10	1975
1976	14	19	15	10	24	33	19	13	1976
1977	24	21	13	13	34	30	17	17	1977
1978	25	29	11	15	31	36	14	19	1978
1979	18	22	11	8	31	37	14	10	1979
1980	20	20	23	6	29	29	30	8	1980
1981	21	24	12	8	32	37	16	10	1981
1982	12	20	19	10	20	33	25	13	1982
1983	23	18	21	7	33	26	27	9	1983
1984	25	28	14	10	32	36	18	13	1984
1985	14	20	23	12	20	29	30	16	1985
1986	19	23	20	11	26	32	26	14	1986

1987	22	31	12	6	31	44	16	8	1987
1988	23	21	14	9	34	31	18	12	1988
1989	18	17	13	14	29	27	17	18	1989
1990	27	23	16	10	36	30	21	13	1990
1991	22	27	20	14	27	33	26	18	1991
1992	26	20	17	11	35	27	22	14	1992
1993	15	25	20	11	21	35	26	14	1993
1994	25	11	21	14	35	15	27	18	1994
1995	21	12	17	13	33	19	22	17	1995
1996	16	21	18	8	25	33	23	10	1996
1997	24	13	16	9	39	21	21	12	1997
1998	17	28	12	14	24	39	16	18	1998
1999	18	22	17	12	26	32	22	16	1999
2000	18	27	25	14	21	32	32	18	2000
Max	29	40	29	18	42	45	38	23	1951–2000
Min	12	10	10	6	20	15	13	8	1951–2000
Średnia	21	22	17	11	30	31	22	14	1951–2000

Tabela IX. Miesięczna i roczna liczba dni pochmurnych (0,1–25% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000
Table IX. The monthly and the annual number of cloudy days (0.1–25% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	10	6	11	1	10	7	3	4	8	5	10	5	80	1951
1952	7	5	7	6	10	9	2	10	10	15	7	5	93	1952
1953	6	6	5	7	7	5	5	6	5	5	5	1	63	1953
1954	7	3	8	9	7	6	14	6	6	10	10	10	96	1954
1955	5	12	7	8	8	8	8	8	6	7	8	12	97	1955
1956	9	6	7	14	4	5	4	8	7	6	9	5	84	1956
1957	4	8	12	7	4	9	8	11	8	5	7	7	90	1957
1958	4	11	9	13	12	10	5	6	8	11	4	8	101	1958
1959	9	9	5	7	8	7	12	8	3	6	6	4	84	1959
1960	7	4	4	11	8	12	8	13	10	11	13	5	106	1960
1961	10	8	12	8	14	8	15	15	7	11	7	9	124	1961
1962	5	17	10	11	14	8	11	14	10	6	5	6	117	1962
1963	6	4	3	5	6	6	5	5	11	8	15	4	78	1963
1964	3	3	4	6	5	8	9	10	5	10	8	5	76	1964
1965	5	12	7	11	14	6	12	7	6	7	3	11	101	1965
1966	8	7	14	12	7	11	12	5	9	4	4	8	101	1966
1967	6	7	11	11	6	4	6	4	12	12	7	7	93	1967
1968	10	6	9	4	11	4	8	5	7	9	5	5	83	1968
1969	7	11	8	8	6	4	6	5	4	6	7	2	74	1969
1970	2	8	8	8	9	7	7	8	7	12	8	6	90	1970
1971	2	4	8	10	4	9	7	4	6	9	5	7	75	1971
1972	3	4	6	7	11	10	5	10	8	13	12	5	94	1972
1973	2	8	7	8	8	4	6	2	9	9	8	6	77	1973
1974	10	7	7	6	9	8	13	10	5	11	11	5	102	1974
1975	5	6	6	10	6	8	5	3	3	10	6	8	76	1975
1976	7	4	12	10	6	6	4	5	10	6	5	4	79	1976
1977	9	6	10	4	7	5	10	9	5	10	10	4	89	1977
1978	5	6	10	7	5	7	8	6	12	6	3	6	81	1978
1979	6	3	11	11	3	6	15	11	8	4	6	7	91	1979
1980	4	5	9	8	4	12	19	13	8	8	7	4	101	1980
1981	9	7	8	3	6	7	7	9	8	12	7	7	90	1981
1982	4	3	7	11	4	5	2	5	4	7	10	5	67	1982
1983	7	6	10	10	4	4	4	2	9	8	6	5	75	1983
1984	2	7	7	7	9	12	9	2	9	9	10	7	90	1984
1985	6	9	9	11	7	13	9	3	9	8	6	1	91	1985
1986	9	3	5	9	4	5	3	10	13	5	8	5	79	1986
1987	1	8	9	9	10	8	9	10	10	3	9	5	91	1987
1988	6	8	13	6	1	8	5	5	12	5	12	6	87	1988
1989	9	10	8	6	5	8	11	6	9	14	6	10	102	1989
1990	4	11	3	10	6	10	6	8	12	4	9	6	89	1990

Tabela IX (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	4	5	12	6	6	7	9	9	4	1	6	5	74	1991
1992	7	6	9	9	4	3	5	4	8	11	8	7	81	1992
1993	9	4	10	4	5	9	9	6	8	6	3	7	80	1993
1994	10	8	15	10	5	7	2	7	9	6	8	10	97	1994
1995	11	9	11	14	5	8	5	4	7	6	7	6	93	1995
1996	7	2	6	5	10	6	10	5	8	8	6	5	78	1996
1997	3	7	8	9	7	4	8	4	10	11	7	4	82	1997
1998	8	5	10	9	8	3	9	8	7	12	7	10	96	1998
1999	10	9	11	9	5	7	3	5	5	10	8	10	92	1999
2000	6	10	12	9	2	5	15	4	9	9	7	4	92	2000
Max	11	17	15	14	14	13	19	15	13	15	15	12	124	1951–2000
Min	1	2	3	1	1	3	2	2	3	1	3	1	63	1951–2000
Średnia	6	7	9	8	7	7	8	7	8	8	7	6	88	1951–2000

Tabela X. Sezonowa liczba dni pochmurnych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000
Table X. The seasonal number of cloudy days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1951	22	14	23	21	28	18	29	26	1951
1952	23	21	32	17	25	23	34	18	1952
1953	19	16	15	13	30	25	24	21	1953
1954	24	26	26	20	25	27	27	21	1954
1955	23	24	21	29	24	25	22	30	1955
1956	25	17	22	20	30	20	26	24	1956
1957	23	28	20	19	26	31	22	21	1957
1958	34	21	23	23	34	21	23	23	1958
1959	20	27	15	22	24	32	18	26	1959
1960	23	33	34	16	22	31	32	15	1960
1961	34	38	25	27	27	31	20	22	1961
1962	35	33	21	28	30	28	18	24	1962
1963	14	16	34	14	18	21	44	18	1963
1964	15	27	23	11	20	36	30	14	1964
1965	32	25	16	28	32	25	16	28	1965
1966	33	28	17	23	33	28	17	23	1966
1967	28	14	31	20	30	15	33	22	1967
1968	24	17	21	21	29	20	25	25	1968

Tabela X (cd.)

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1969	22	15	17	20	30	20	23	27	1969
1970	25	22	27	16	28	24	30	18	1970
1971	22	20	20	13	29	27	27	17	1971
1972	24	25	33	12	26	27	35	13	1972
1973	23	12	26	16	30	16	34	21	1973
1974	22	31	27	22	22	30	26	22	1974
1975	22	16	19	19	29	21	25	25	1975
1976	28	15	21	15	35	19	27	19	1976
1977	21	24	25	19	24	27	28	21	1977
1978	22	21	21	17	27	26	26	21	1978
1979	25	32	18	16	27	35	20	18	1979
1980	21	44	23	13	21	44	23	13	1980
1981	17	23	27	23	19	26	30	26	1981
1982	22	12	21	12	33	18	31	18	1982
1983	24	10	23	18	32	13	31	24	1983
1984	23	23	28	16	26	26	31	18	1984
1985	27	25	23	16	30	27	25	18	1985
1986	18	18	26	17	23	23	33	22	1986

1987	28	27	22	14	31	30	24	15	1987
1988	20	18	29	20	23	21	33	23	1988
1989	19	25	29	29	19	25	28	28	1989
1990	19	24	25	21	21	27	28	24	1990
1991	24	25	11	14	32	34	15	19	1991
1992	22	12	27	20	27	15	33	25	1992
1993	19	24	17	20	24	30	21	25	1993
1994	30	16	23	28	31	16	24	29	1994
1995	30	17	20	26	32	18	22	28	1995
1996	21	21	22	14	27	27	28	18	1996
1997	24	16	28	14	29	20	34	17	1997
1998	27	20	26	23	28	21	27	24	1998
1999	25	15	23	29	27	16	25	32	1999
2000	23	24	25	20	25	26	27	22	2000
Max	35	44	34	29	35	44	44	32	1951–2000
Min	14	10	11	11	18	13	15	13	1951–2000
Średnia	24	22	23	19	27	25	26	22	1951–2000

Tabela XI. Miesięczna i roczna liczba dni słonecznych (50,1–75% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000
Table XI. The monthly and the annual number of sunny days (50.1–75% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	5	3	2	9	10	7	13	16	5	13	1	3	87	1951
1952	0	2	4	9	8	4	8	3	3	0	0	3	44	1952
1953	0	2	5	9	6	9	8	10	7	8	9	6	79	1953
1954	5	10	5	3	5	9	7	15	8	7	2	0	76	1954
1955	4	4	6	7	12	8	6	12	10	9	2	1	81	1955
1956	3	3	3	2	7	5	9	6	8	5	8	4	63	1956
1957	4	3	7	4	12	7	10	10	6	4	5	2	74	1957
1958	3	2	4	3	4	7	11	7	2	5	2	4	54	1958
1959	4	3	4	7	6	8	6	9	11	8	5	0	71	1959
1960	2	8	8	5	7	4	4	6	9	5	4	2	64	1960
1961	6	4	5	13	6	11	3	6	8	3	3	4	72	1961
1962	4	0	6	6	3	10	5	5	6	5	1	2	53	1962
1963	7	1	5	4	5	11	8	7	8	4	3	4	67	1963
1964	6	6	7	5	3	7	9	7	4	4	0	1	59	1964
1965	4	6	9	5	6	9	7	9	8	9	4	2	78	1965
1966	0	3	1	8	4	10	10	9	9	7	1	2	64	1966
1967	1	3	5	3	4	11	7	10	8	7	6	2	67	1967
1968	1	0	4	6	4	9	10	8	9	3	1	2	57	1968
1969	13	10	8	1	2	3	2	6	3	5	15	21	89	1969
1970	2	6	4	4	10	7	8	9	6	4	2	1	63	1970
1971	9	2	7	8	9	8	8	10	6	8	1	2	78	1971
1972	3	0	5	4	5	6	8	4	8	6	1	6	56	1972
1973	6	0	8	9	5	8	6	10	9	3	5	0	69	1973
1974	2	3	6	8	5	9	4	7	9	1	5	4	63	1974
1975	3	5	4	7	7	6	11	6	13	2	4	0	68	1975
1976	1	2	5	6	6	5	7	7	6	7	1	3	56	1976
1977	1	1	7	5	6	8	9	3	8	4	3	1	56	1977
1978	4	3	4	4	6	5	5	7	6	6	6	3	59	1978
1979	3	6	6	5	8	5	6	5	7	8	2	2	63	1979
1980	4	3	6	5	5	7	1	3	6	4	1	3	48	1980
1981	3	0	3	9	9	6	8	7	7	2	2	1	57	1981
1982	7	7	5	10	11	6	11	8	13	7	6	1	92	1982
1983	2	3	3	6	14	7	7	5	11	12	2	6	78	1983
1984	2	3	10	3	3	6	4	7	5	7	5	2	57	1984
1985	5	3	3	3	12	0	7	9	8	5	3	4	62	1985
1986	2	8	9	10	7	8	7	9	5	12	7	4	88	1986
1987	5	6	5	3	9	4	10	7	8	12	0	2	71	1987
1988	5	4	2	8	13	11	10	13	3	9	3	2	83	1988
1989	5	5	7	7	10	10	7	13	9	8	4	3	88	1989
1990	3	3	6	2	5	8	5	4	2	11	1	1	51	1990

Tabela XI (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	3	4	3	13	11	7	6	7	8	9	5	4	80	1991
1992	3	4	6	6	8	7	8	11	7	4	2	7	73	1992
1993	7	3	9	6	5	10	8	8	5	6	2	0	69	1993
1994	0	4	4	4	6	6	5	13	6	2	3	3	56	1994
1995	2	5	9	3	6	12	5	5	5	4	6	5	67	1995
1996	4	5	7	6	11	8	7	10	3	5	3	2	71	1996
1997	4	7	5	5	8	3	10	6	10	1	4	0	63	1997
1998	3	4	7	7	7	8	8	8	7	3	2	1	65	1998
1999	7	2	4	2	5	6	10	10	11	3	3	1	64	1999
2000	1	2	5	8	6	4	3	11	1	8	1	3	53	2000
Max	9	10	10	13	14	12	13	16	13	13	9	7	92	1951–2000
Min	0	0	1	2	3	0	1	3	1	0	0	0	44	1951–2000
Średnia	3	4	5	6	7	7	7	8	7	6	3	2	67	1951–2000

Tabela XII. Sezonowa liczba dni słonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000
Table XII. The seasonal number of sunny days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1951	21	36	19	11	24	41	22	13	1951
1952	21	15	3	5	48	34	7	11	1952
1953	20	27	24	8	25	34	30	10	1953
1954	13	31	17	15	17	41	22	20	1954
1955	25	26	21	9	31	32	26	11	1955
1956	12	20	21	10	19	32	33	16	1956
1957	23	27	15	9	31	36	20	12	1957
1958	11	25	9	9	20	46	17	17	1958
1959	17	23	24	7	24	32	34	10	1959
1960	20	14	18	12	31	22	28	19	1960
1961	24	20	14	14	33	28	19	19	1961
1962	15	20	12	6	28	38	23	11	1962
1963	14	26	15	12	21	39	22	18	1963
1964	15	23	8	13	25	39	14	22	1964
1965	20	25	21	12	26	32	27	15	1965
1966	13	29	17	5	20	45	27	8	1966
1967	12	28	21	6	18	42	31	9	1967
1968	14	27	13	3	25	47	23	5	1968

Tabela XII (cd.)

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1969	17	18	16	4	31	33	29	7	1969
1970	18	24	12	9	29	38	19	14	1970
1971	24	26	15	13	31	33	19	17	1971
1972	14	18	15	9	25	32	27	16	1972
1973	22	24	17	6	32	35	25	9	1973
1974	19	20	15	9	30	32	24	14	1974
1975	18	23	19	8	26	34	28	12	1975
1976	17	19	14	6	30	34	25	11	1976
1977	18	20	15	3	32	36	27	5	1977
1978	14	17	18	10	24	29	31	17	1978
1979	19	16	17	11	30	25	27	17	1979
1980	16	11	11	10	33	23	23	21	1980
1981	21	21	11	4	37	37	19	7	1981
1982	26	25	26	15	28	27	28	16	1982
1983	23	19	25	11	29	24	32	14	1983
1984	16	17	17	7	28	30	30	12	1984
1985	18	16	16	12	29	26	26	19	1985
1986	26	24	24	14	30	27	27	16	1986

1987	17	21	20	13	24	30	28	18	1987
1988	23	34	15	11	28	41	18	13	1988
1989	24	30	21	13	27	34	24	15	1989
1990	13	17	14	7	25	33	27	14	1990
1991	27	20	22	11	34	25	28	14	1991
1992	20	26	13	14	27	36	18	19	1992
1993	20	26	13	10	29	38	19	14	1993
1994	14	24	11	7	25	43	20	13	1994
1995	18	22	15	12	27	33	22	18	1995
1996	24	25	11	11	34	35	15	15	1996
1997	18	19	15	11	29	30	24	17	1997
1998	21	24	12	8	32	37	18	12	1998
1999	11	26	17	10	17	41	27	16	1999
2000	19	18	10	6	36	34	19	11	2000
Max	27	36	26	15	48	47	34	22	1951–2000
Min	11	11	3	3	17	22	7	5	1951–2000
Średnia	19	23	16	9	28	34	24	14	1951–2000

Tabela XIII. Miesięczna i roczna liczba dni bardzo słonecznych (powyżej 75% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000
Table XIII. The monthly and the annual number of very sunny days (above 75% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1951	1	1	0	9	0	2	3	4	8	7	0	0	35	1951
1952	1	0	8	6	2	5	12	10	3	0	0	0	47	1952
1953	1	0	11	9	10	6	6	6	7	6	1	0	63	1953
1954	0	2	1	1	5	5	0	2	2	2	0	0	20	1954
1955	0	0	2	1	1	1	4	2	6	2	0	0	19	1955
1956	0	1	9	1	6	1	1	1	8	4	0	2	34	1956
1957	0	1	7	6	2	9	3	2	2	3	2	0	37	1957
1958	0	1	1	2	6	4	3	7	11	1	0	0	36	1958
1959	0	1	8	5	6	7	5	3	4	9	0	0	48	1959
1960	0	2	11	2	5	1	1	4	3	2	0	1	32	1960
1961	1	0	0	4	0	2	3	2	10	4	1	0	27	1961
1962	0	0	3	4	1	4	6	2	4	6	0	0	30	1962
1963	0	1	7	6	3	3	9	3	3	0	0	2	37	1963
1964	2	2	3	7	10	7	7	5	10	6	1	1	61	1964
1965	0	0	0	3	3	4	2	5	5	5	0	0	27	1965
1966	0	0	2	2	7	8	3	8	3	3	0	0	36	1966
1967	2	1	1	2	11	7	14	5	1	5	2	2	53	1967
1968	0	2	6	7	4	10	6	10	6	1	4	5	61	1968
1969	7	2	4	11	7	9	10	9	9	6	1	3	78	1969
1970	0	0	0	0	4	12	6	8	6	1	2	0	39	1970
1971	3	0	1	3	6	3	13	12	1	2	2	1	47	1971
1972	5	4	8	2	4	5	7	5	1	2	1	7	51	1972
1973	2	0	2	1	5	7	4	16	5	5	3	2	52	1973
1974	0	6	9	7	6	2	1	7	4	1	0	0	43	1974
1975	3	6	3	4	7	4	6	13	6	1	3	4	60	1975
1976	3	11	0	7	11	14	12	9	2	3	1	0	73	1976
1977	0	0	2	4	5	10	4	6	3	7	2	3	46	1977
1978	2	0	3	5	10	9	9	2	0	2	1	1	44	1978
1979	0	3	0	4	12	11	2	5	5	12	0	0	54	1979
1980	3	0	2	5	11	4	1	4	3	0	0	2	35	1980
1981	0	5	4	6	7	3	2	6	4	3	0	0	40	1981
1982	3	0	9	3	9	6	11	14	4	6	1	0	66	1982
1983	0	1	0	2	3	9	13	17	1	0	3	1	50	1983
1984	1	4	1	6	2	3	5	12	1	2	5	1	43	1984
1985	1	0	0	7	5	3	8	6	0	0	0	1	31	1985
1986	0	0	2	2	12	9	8	5	2	5	0	1	46	1986
1987	1	1	5	2	4	1	3	4	2	6	0	0	29	1987
1988	1	0	0	9	6	2	6	6	2	8	6	0	46	1988
1989	2	1	6	3	11	2	9	5	6	2	0	1	48	1989
1990	2	7	5	4	14	5	6	12	0	8	0	4	67	1990

Tabela XIII (cd.)

Lata	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok	Lata
1991	6	1	3	1	2	1	11	7	9	6	0	1	48	1991
1992	2	1	4	0	7	11	12	7	6	0	0	mm	50	1992
1993	2	1	0	10	12	3	4	6	3	2	1	1	45	1993
1994	0	2	2	4	5	10	21	5	0	5	6	1	61	1994
1995	2	1	0	4	8	4	18	14	1	7	0	2	61	1995
1996	4	6	5	10	3	8	2	6	1	4	3	4	56	1996
1997	2	1	5	5	6	4	2	15	3	3	0	2	48	1997
1998	3	2	3	4	10	6	3	5	3	2	1	1	43	1998
1999	2	0	6	5	14	4	12	4	8	4	1	2	62	1999
2000	3	1	1	7	16	13	0	7	7	5	0	1	61	2000
Max	7	11	11	11	16	14	21	17	11	12	6	7	78	1951–2000
Min	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	19	1951–2000
Średnia	1	2	4	4	7	6	6	7	4	4	1	1	47	1951–2000

Tabela XIV. Sezonowa liczba dni bardzo słonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000
Table XIV. The seasonal number of very sunny days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1951	9	9	15	2	26	26	43	6	1951
1952	16	27	3	1	34	57	6	2	1952
1953	30	18	14	1	48	29	22	2	1953
1954	7	7	4	2	35	35	20	10	1954
1955	4	7	8	0	21	37	42	0	1955
1956	16	3	12	3	47	9	35	9	1956
1957	15	14	7	1	41	38	19	3	1957
1958	9	14	12	1	25	39	33	3	1958
1959	19	15	13	1	40	31	27	2	1959
1960	18	6	5	3	56	19	16	9	1960
1961	4	7	15	1	15	26	56	4	1961
1962	8	12	10	0	27	40	33	0	1962
1963	16	15	3	3	43	41	8	8	1963
1964	20	19	17	5	33	31	28	8	1964
1965	6	11	10	0	22	41	37	0	1965
1966	11	19	6	0	31	53	17	0	1966
1967	14	26	8	5	26	49	15	9	1967
1968	17	26	11	7	28	43	18	11	1968

Tabela XIV (cd.)

Lata	Wiosna III–V	Lato VI–VIII	Jesień IX–XI	Zima XII–II	Wiosna III–V (%)	Lato VI–VIII (%)	Jesień IX–XI (%)	Zima XII–II (%)	Lata
1969	22	28	16	12	28	36	21	15	1969
1970	4	26	9	0	10	67	23	0	1970
1971	10	28	5	4	21	60	11	9	1971
1972	14	17	4	16	27	33	8	31	1972
1973	8	27	13	4	15	52	25	8	1973
1974	22	10	5	6	51	23	12	14	1974
1975	14	23	10	13	23	38	17	22	1975
1976	18	35	6	14	25	48	8	19	1976
1977	11	20	12	3	24	43	26	7	1977
1978	18	20	3	3	41	45	7	7	1978
1979	16	18	17	3	30	33	31	6	1979
1980	18	9	3	5	51	26	9	14	1980
1981	17	11	7	5	43	28	18	13	1981
1982	21	31	11	3	32	47	17	5	1982
1983	5	39	4	2	10	78	8	4	1983
1984	9	20	8	6	21	47	19	14	1984
1985	12	17	0	2	39	55	0	6	1985
1986	16	22	7	1	35	48	15	2	1986
1987	11	8	8	2	38	28	28	7	1987
1988	15	14	16	1	33	30	35	2	1988
1989	20	16	8	4	42	33	17	8	1989
1990	23	23	8	13	34	34	12	19	1990
1991	6	19	15	8	13	40	31	17	1991
1992	11	30	6	3	22	60	12	6	1992
1993	22	13	6	4	49	29	13	9	1993
1994	11	36	11	3	18	59	18	5	1994
1995	12	36	8	5	20	59	13	8	1995
1996	18	16	8	14	32	29	14	25	1996
1997	16	21	6	5	33	44	13	10	1997
1998	17	14	6	6	40	33	14	14	1998
1999	25	20	13	4	40	32	21	6	1999
2000	24	20	12	5	39	33	20	8	2000
Max	30	39	17	16	56	78	56	31	1951–2000
Min	4	3	0	0	10	9	0	0	1951–2000
Średnia	15	19	9	4	32	40	20	9	1951–2000

Tabela XV. Średnie 10-minutowe natężenie całkowitego promieniowania słonecznego (I_t) większe lub równe 1000 Wm^{-2} i synchroniczne wartości natężenia ultrafioletowego promieniowania słonecznego (I_{uv}, Wm^{-2}) oraz wielkość i rodzaj zachmurzenia nieba na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001

Table XV. The mean 10-minute intensity of total solar radiation (I_t) equal or above 1000 Wm^{-2} and the synchronous values of intensity of UV solar radiation (I_{uv}, Wm^{-2}) and amount and type of cloudiness at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001

Lp.	Data	Godzina	I_t	I_{uv}	Zachmurzenie	Rodzaj zachmurzenia
1	25 V 1997	12.00	1000	36,8	2	*Cu med*
2	4 VI 1997	11.40	1040	39,4	2	*Cu med, Sc*
3	4 VI 1997	12.20	1030	38,5	2	*Cu med, Sc*
4	6 VI 1997	10.20	1021	36,1	2	*Cu med*
5	16 VI 1997	10.50	1029	39,3	2	*Cu med*
6	16 VI 1997	13.00	1011	38	2	*Cu med*
7	18 VI 1997	12.50	1008	37,8	2	*Cu med*
8	13 VII 1997	12.50	1040	40,9	9	*Cb cap, Cu*
9	14 VII 1997	11.50	1095	39,7	2	*Cu med*
10	15 VII 1997	11.50	1032	37,5	2	*Cu con*
11	29 VII 1997	11.50	1021	37,5	2	*Cu med*
12	5 VI 1998	12.10	1002	36,6	2	*Cu con, Sc*
13	16 VI 1998	10.50	1005	40,6	9	*Cb cap, Cu*
14	29 VI 1998	13.20	1070	39,3	2	*Cu med, Sc*
15	3 VII 1998	10.50	1005	39,8	2, 3	*Cu med, Ac tr*
16	17 VII 1998	12.40	1021	38,7	2	*Cu med*
17	31 V 1999	11.20	1016	40	2, 3	*Cu med, Ac pe*
18	31 V 1999	11.50	1003	39,3	1, 5	*Cu hum, Ac pe*
19	19 VI 1999	11.10	1032	41,3	2, 1	*Cu med, Sc, Ci fib*
20	19 VI 1999	11.20	1029	41,1	2, 1	*Cu med, Sc, Ci fib*
21	24 VI 1999	10.40	1012	40,4	2, 3, 1	*Cu med, Ac pe, Ci fib*
22	24 VI 1999	11.00	1006	40,8	2, 3, 1	*Cu med, Ac pe, Ci fib*
23	24 VI 1999	11.10	1001	40,2	2, 3, 1	*Cu med, Ac pe, Ci fib*
24	24 VI 1999	11.20	1004	40,5	2, 3, 1	*Cu med, Ac pe, Ci fib*
25	24 VI 1999	11.30	1048	41,3	2, 3, 1	*Cu med, Ac pe, Ci fib*
26	25 VI 1999	12.00	1047	42,2	9	*Cb cap*
27	25 VI 1999	12.10	1055	42,4	9	*Cb cap*
28	15 VII 1999	11.10	1038	41,4	2	*Cu con*
29	25 VII 1999	12.20	1007	39,5	2	*Cu med*
30	22 V 2000	11.40	1024	41,35	4	*Cu con*
31	7 VI 2000	11.30	1054	42,35	5	*Cu med*
32	16 VI 2000	13.40	1017	38,49	6	*Cb cal, Cu*
33	13 VII 2000	12.20	1004	40,81	5	*Cu med*
34	19 V 2001	11.20	1037	40,84	3	*Cb cal, Cu*
35	12 VI 2001	11.50	1001	41,89	3	*Cb cal, Cu*
36	14 VI 2001	12.20	1033	40,13	2	*Cu med*
37	21 VI 2001	11.50	1014	41,53	2	*Cu con*
38	22 VI 2001	12.30	1028	42,88	3	*Cb cal*
39	24 VI 2001	11.00	1016	41,83	2	*Cu med*
40	1 VII 2001	11.00	1016	39,93	2	*Cu med*

LITERATURA

Al-Aruri S.D., 1990, *The empirical relationship between global radiation and global ultraviolet (0.290–0.385) μm solar radiation components*, Solar Energy, 2, 61–64.

Ambach W., Blumthaler M., Wendler G., 1991, *A comparison of ultraviolet radiation measured at an Arctic and an Alpine Site*, Solar Energy, 2, 121–126.

Andrady A.L., Hamid S.H., Torikai A., 1998, *Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials*, Jour. Photochem. Photobiol., B: Biology, 46, 96–103.

Angström A., 1924, *Solar and terrestrial radiation*, Quart. J. R. Met. Soc., 50, 121–126.

Atlas Miasta Łodzi, 2002, Plansza X – Klimat, Wyd. Urząd Miasta Łodzi, Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Łódź.

Bais A.F, Zerefos C.S., Meleti C., Ziomas I.C., Tourpali K., 1993, *Spectral measurements of solar UVB radiation and its relations to total ozone, SO_2 and clouds*, J. Geophys. Res., 98 (D3), 5199–5204.

Bednar J., 1990, *Recent changes of the sunshine in Prague Region*, [w:] Brazdil R. (ed.), *Climatic Change in the Historical and the Instrumental Periods*, Masaryk University, Brno, 240–242.

Berljand T.G., 1961, *Raspriedielenie sołniecznoj radiacji na kontinientach*, Gidrometeoizdat, Leningrad.

Black J.N., Bonython C.W., Prescott J.A., 1954, *Solar radiation and the duration of sunshine*, Q. J. Met. Soc., 80, 231–235.

Blackman R.B., Tukey J.W., 1959, *The Measurements of Power Spectra from the Point of View of Communication Engineering*, Dover Publications, New York.

Błażejczyk K., 2002, *Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej*, Dok. Geogr., nr 26, PAN IGiPZ, Warszawa.

Błażejczyk K., Baranowski J., 2003, *Solar and UV radiation in the Warsaw Downtown. Proceedings of Fifth International Conference on Urban Climate, 1–5 September 2003*, Łódź.

Blumthaler M., Ambach W., 1988, *Solar UVB albedo of various surfaces*, Photochem. Photobiol., 1, 85–88.

Blumthaler M., Ambach W., Canaval H., 1985, *Seasonal variation of solar UV-radiation at a high mountain station*, Photochem. Photobiol., 2, 147–152.

Blumthaler M., Ambach W., Salzgeber M., 1994, *Effects of cloudiness on global and diffuse UV irradiance in a high-mountain area*, Theor. Appl. Climatol., 50, 23–30.

Bogdańska B., Podogrocki J., 2000, *Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961–1995*, Mat. Badawcze, Meteorologia, nr 30, IMGW, Warszawa.

Bogdańska B., Podogrocki J., Żółtowska K., 2002, *Sieć pomiarów promieniowania słonecznego w Polsce i baza danych aktynometrycznych. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń, 16–17 IX 1993*, 55–70.

Bordewijk J.A., Hill W.J., Reisel G.C.,Tiao G.C., 1995, *Total solar radiation and the influence of clouds and aerosol on the biological effective UV*, Geophys. Res. Lett., 22, 2151–2154.

Boryczka J., 1998, *Zmiany klimatu Ziemi*, Wyd. Akademickie Dialog, Warszawa.

Bryś K., 1994, *Natężenie promieniowania słonecznego całkowitego we Wrocławiu w okresie 1961–1990*, Zesz. Nauk. Akad. Roln. we Wrocławiu, 243, 37–49.

Bryś K., 2001, *Wahania natężenia promieniowania całkowitego w latach 1961–1993 we Wrocławiu. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń, 16–17 IX 1993*, 71–82.

Bryś K., Bryś T., 2001, *Wahania natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w 55-letniej serii wrocławskiej (1946–2000)*, Prace i Studia Geograficzne, t. 29, Warszawa, 161–171.

Charvatova I., Strestik J., 1994, *Udział długofalowych naturalnych zmian w obecnym ociepleniu globalnym*, [w:] *Globalne ocieplenie a współczesne zmiany klimatyczne w Polsce. Materiały konferencji międzynarodowej, 31 maja–1 czerwca 1993*, Szczecin.

Chomicz K., Kuczmarska L., 1971, *Zachmurzenie i usłonecznienie w Polsce*, Przegl. Geofiz., z. 1/2, 69–89.

Cieślak L., 1959, *Usłonecznienie Kudowy i Polanicy*, Wiad. Uzdr., 1/2.

Coppolino S., 1994, *A new correlation between clearness index and relative sunshine*, Renewable Energy, 4, 417–423.

Daniłowa N.A., 1988, *Przyroda i nasze zdrowie*, Wiedza Powszechna, Warszawa.

De Bruin H.A.R., Van Den Hurk B.J.J.M., Welgraven D., 1995, *A series of global radiation at Wageningen for 1928–1992*, Int. J. Climatol., 15, 1253–1272.

Degirmendžić J., 1995, *Quasi-miesięczne cykliczne wahania temperatury powietrza*, Przegl. Geofiz., z. 3, 293–303.

Degünther M., Meerkötter R., 2000, *Effect of remote clouds on surface UV irradiance*, Ann. Geophysicae, 18, 679–686.

Diffey B.L, 1991, *Solar ultraviolet radiation effects on biological systems*, Phys. Med. Biol., 36, 299.

Dobesch H., 1992, *On the variations of Sunshine Duration in Austria*, Theor. Appl. Climatol., 46, 33–38.

Dubicka M., 1979, *Natężenie promieniowania słonecznego we Wrocławiu w 1965 r.*, Acta Univ. Wratisl., nr 395, Pr. Obserw. Meteor. i Klimat. Uniw. Wroc., nr 20, 201–224.

Dubicka M., 1990, *Trends of changes of sunshine duration in South-Western Poland on the background of atmospheric circulation*, [w:] Brazdil R., *Climatic change in the historical and the instrumental periods*, Masaryk University, Brno, 243–245.

Dubicka M., 1994, *Wpływ cyrkulacji atmosfery na kształtowanie warunków klimatu (na przykładzie Wrocławia)*, Acta Univ. Wratisl., nr 1581, Studia Geogr., t. 60.

Dubicka M., Karal J., 1982, *Usłonecznienie we Wrocławiu w latach 1971–1980. Materiały V Seminarium Fitoaktynometrii*, Puławy, 57–68.

Dubicka M., Karal J., 1988, *Warunki usłonecznienia we Wrocławiu z uwzględnieniem tendencji jego zmian*, Acta Univ. Wratisl., nr 738, Biuletyn Meteo., nr 29 (4), 77–98.

Dubicka M., Karal J., Ropuszyński P., 1995, *Usłonecznienie we Wrocławiu w latach 1981–1992 na tle stuletniej serii obserwacyjnej*, Acta Univ. Wratisl., nr 1705, Prace Inst. Geograf., ser. C, Meteorologia i Klimatologia, t. 2, 5–21.

Dubicka M., Limanówka D., 1994, *Zmienność zachmurzenia i usłonecznienia w Sudetach i Karpatach oraz na ich przedpolu*, Acta Univ. Wratisl., nr 1590, Prace Inst. Geogr., ser. C, Meteorologia i Klimatologia, t. 1, 45–60.

Dubicka M., Pyka J.L., 2001, *Klimat Wrocławia w XX wieku*, Prace i Studia Geograficzne Uniwersytetu Warszawskiego, t. 29, Warszawa, 101–112.

Dziewulska-Łosiowa A., 1962, *Próba oceny zakłócenia przezroczystości atmosfery w Warszawie*, Przegl. Geofiz., 2, 111–116.

Dziewulski W., 1917, *O przebiegu rocznym usłonecznienia w Krakowie, Zakopanem i Lwowie*, Spraw. Kom. Fizj. AU, t. 51, 18–40.

Elhadidy M. A., Abdel-Nabi D.Y., Kruss P.D., 1990, *Ultraviolet solar radiation at Dhahran, Saudi Arabia*, Solar Energy, 6, 315–319.

Estupinan J.G., Raman S., 1996, *Effects of clouds and haze on UVB radiation*, J. Geoph. Res. D11, 16, 807–816.

Feister U., Grasnick K.H., 1992, *Solar UV radiation measurements at Potsdam (52°22'N, 13°5'E)*, Solar Energy, 6, 541–548.

Flemming G., 1983, *Klimat – środowisko – człowiek*, PWRL, Warszawa.

Fortuniak K., 1994, *Wpływ aglomeracji łódzkiej na usłonecznienie*, Przegl. Geofiz., z. 2, 169–178.

Fortuniak K., 1995, *Cechy dobowego i rocznego przebiegu usłonecznienia w Łodzi*, Klimat i Bioklimat Miast, Wyd. UŁ, Łódź, 99–110.

Fortuniak K., 1999, *Porównanie wybranych metod weryfikacji domniemanych cykli klimatycznych*, [w:] *Zmiany i zmienność klimatu Polski. Ogólnopolska konferencja naukowa, Łódź, 4–6 listopada 1999*, 71–75.

Fortuniak K., 2000a, *Regularities in the Polish temperature time series and climate prediction or reconstruction*, Prace Geogr., z. 107, Instytut Geografii UJ, Kraków 357–363.

Fortuniak K., 2000b, *Stochastyczne i deterministyczne aspekty zmienności wybranych elementów klimatu Polski*, Acta Univ. Lodz., Folia Geogr. Phys., nr 4.

Fortuniak K., 2002, *Fraktalne wymiary usłonecznienia. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika pt. „Działalność naukowa profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja", Toruń, 16–17 IX 1993*, 123–129.

Fortuniak K., 2003, *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.

Fortuniak K., Offerle B., Grimmond S., Oke T., Kłysik K., Wibig J., 2001, *A system to observe the urban energy balance: Initial results from winter-time measurements in Łódź*, Ann. UMCS, ser. B, t. 55/56, nr 19, 167–176.

Fortuniak K., Wibig J., 2002, *Roczny przebieg zachmurzenia oraz częstość dni pogodnych i pochmurnych w Łodzi. Wartości z trzech terminów obserwacyjnych: godz. 7.00, 13.00, 19.00*, [w:] *Atlas Miasta Łodzi*, Plansza X – Klimat, Wyd. Urząd Miasta Łodzi, Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Łódź.

Foyo-Moreno I., Vida J., Alados-Arboledas L., 1998, *Ground based ultraviolet (290–395 nm) and broadband solar radiation measurement in South-Eastern Spain*, Int. J. Climatol., 18, 1389–1400.

Gerstengarbe F.W., Werner P.C., 1999, *Estimation of the beginning and end of recurement events within a climate regime*, Climate Research, vol. 11, 97–107.

Glover J., McCulloch J.S., 1958, *The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine*, Quart. J. R. Met. Soc., 84, 172–175.

Głowicki B., 1999, *Zmienność dobowych maksimów i minimów temperatury powietrza w Sudetach w bieżącym stuleciu*, [w:] *Zmiany i zmienność klimatu Polski. Ogólnopolska konferencja naukowa, Łódź, 4–6 listopada 1999*, 77–80.

Gluza A., Filipiuk E., 1995, *Usłonecznienie w Lublinie w latach 1952–1991*, Wiad. IMGW, 1, 91–101.

Gorczyński W., 1910, *O przebiegu rocznym i dziennym usłonecznienia w Krakowie*, Spr. TNW, t. 3, 162–178.

Gorczyński W., 1912, *O insolacyi ziem polskich*, [w:] *Encykl. Pol.*, t. 1, Kraków, 161–170.

Gorczyński W., 1913, *Wartości pyrheliometryczne i sumy ciepła dla Warszawy według pomiarów w okresie 1901–1913*, Wyd. Tow. Nauk. Warsz., Warszawa.

Gorczyński W., 1914, *Wartości usłonecznienia dla Warszawy w okresie 1903–1913*, Wiad. Matem., t. 18.

Gorczyński W., 1911, *O zmienności opadów według obserwacji warszawskich od 1803 roku*, Spraw. z Pos. Tow. Nauk. Warsz., Wydz. II, t. 4, z. 9.

Gorczyński W., 1915, *W sprawie zmian długoletnich temperatury powietrza w Polsce i Eurazji*, Spraw. z Pos. Tow. Nauk. Warsz., Wydz. II, t. 8, z. 2.

Gorczyński W., 1938, *O uprzywilejowanym charakterze usłonecznienia na wybrzeżu polskim (wraz z W.M. Gdańskiem) w porównaniu z innymi dzielnicami Polski*, Spraw. z Pos. Tow. Nauk. Warsz., Wydz. III, t. 31, z. 7/9, 139–163.

Gorczyński W., 1939a, *Stosunki usłonecznienia Warszawy (1903–1938) oraz ich porównanie z Gdynią i Gdańskiem*, Spraw. z Pos. Tow. Nauk. Warsz., Wydz. III, t. 32, 1–36.

Gorczyński W., 1939b, *Czas trwania usłonecznienia Gdyni z Gdańskiem oraz na Helu, na tle innych stacji polskich i całego Bałtyku*, Spraw. z Pos. Tow. Nauk. Warsz., Wydz. III, t. 32, z. 1/3, 34–37.

Gorczyński W., 1950, *O pomiarach natężenia promieniowania słonecznego*, Gaz. Obserw. PIHM, 4 (28), 1–7.

Górski T., Górska K., 2000, *Usłonecznienie w Puławach w ciągu lat 1923–1992*, Acta Univ. Nicolai Copernici, Geografia, t. 31, Nauki Matematyczno-Przyrodnicze, z. 106, 141–156.

Gregorczuk M., Kuczmarski M., 1979, *Tendencje zmian usłonecznienia w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym i na obszarach przyległych*, Przegl. Geogr., 4, 743–751.

Haurwitz B., 1946, *Relation between solar activity and the lower atmosphere. Transactions*, American Geophysical Union, vol. 27, no. 2.

Hess M., Leśniak B., Olecki Z., Rauczyńska-Olecka A., 1980, *Wpływ krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej na promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., z. 51, 7–73.

Hess M., Olecki Z., 1990, *Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., z. 77, 29–43.

Horecka V., 1990, *Trend of sunshine in Slovakia*, [w:] Brazdil R., *Climatic change in the historical and the instrumental periods*, Masaryk University, Brno, 246–248.

Horneck G., 1995, *Quantification of the biological effectiveness of environmental UV radiation*, Photochem. Photobiol., B: Biol., 31, 43–49.

Iqbal M., 1983, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, New York.

Jankowiak J. (red.), 1976, *Biometeorologia człowieka*, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa.

Kasten F., 1966, *A new table and approximate formula for the relative optical air mass*, Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., ser. B, 14 (2), 206–223.

Kędziora A., 1995, *Podstawy agrometeorologii*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań.

Khogali A., Al-Bar O.F., 1992, *A study of solar ultraviolet radiation at Makkah solar station*, Solar Energy, 2, 79–87.

Kimball H.H., 1919, *Variations in the total and luminous radiation with geographical position in the United States*, Mon. Weath. Rev., 47, 769.

Kłysik K., 1969, *O usłonecznieniu w Polsce*, Zesz. Nauk. UŁ, Nauki Matematyczno-Przyrodnicze, ser. II, z. 32, 89–103.

Kłysik K., 1974, *Cechy dobowego i rocznego przebiegu usłonecznienia w Łodzi*, Zesz. Nauk. UŁ, Nauki Matematyczno-Przyrodnicze, ser. II, z. 63, 23–32.

Kłysik K., Fortuniak K., 1999, *Wieloletnie tendencje zmian stężenia dwutlenku siarki w Łodzi*, [w:] *Stan środowiska w województwie łódzkim w 1998 roku*, cz. III: *Jakość podstawowych elementów środowiska*, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, Łódź, 71–77.

Kondratiew K. J., 1965, *Aktinometrija*, Gidrometeoizdat, Leningrad.

Kondratiew K.Ya., Binenko V.I., Melnikova I.N., 1998, *Absorption of solar radiation by clouds and aerosols in the visible wavelenght region*, Meteorol. Atmos. Phys., 65, 1–10.

Kozłowska-Szczęsna T., 1991, *Antropoklimat Polski*, Zesz. IGiPZ PAN, 1, 1–64.

Kozłowska-Szczęsna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., 1997, *Bioklimatologia człowieka. Metody i ich zastosowanie w badaniach bioklimatu Polski*, IGiPZ PAN, Monografie, t. 1, Warszawa.

Kozłowska-Szczęsna T., Podogrocki J., 1995, *Antropogeniczne zmiany warunków radiacyjnych w Warszawie*, Klimat i Bioklimat Miast, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, 87–97.

Kożuchowski K. (red.), 2000, *Pory roku w Polsce – sezonowe zmiany w środowisku a wieloletnie tendencje klimatyczne*, Łódź.

Kożuchowski K., 1985, *Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w stuleciu 1881–1980*, Ossolineum, Acta Geogr. Lodziensia, 48.

Kożuchowski K., 1989, *Makrotypy cyrkulacji atmosfery a temperatura powietrza w Polsce*, Przegl. Geofiz., t. 34, z. 4, 427–435.

Kożuchowski K., 1990, *Materiały do poznania historii klimatu w okresie obserwacji instrumentalnych*, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.

Kożuchowski K., 1995, *Głębokie cyklony, antycyklony i cyrkulacja strefowa nad Europą (1900–1990)*, Przegl. Geofiz., z. 3, 161–171.

Kożuchowski K., Wibig J., 1988, *Kontynentalizm pluwialny w Polsce: zróżnicowanie geograficzne i zmiany wieloletnie*, Acta Univ. Lodz., nr 55.

Krawczyk B., 1968, *Badania zmętnienia atmosfery w Warszawie w latach 1961–1963*, Przegl. Geogr., 4, 823–832.

Krawczyk B., 1974, *Próba wyznaczenia udziału absorpcji selektywnej w dopływie do powierzchni ziemi bezpośredniego promieniowania słonecznego*, Przegl. Geogr., 1, 121–127.

Krawczyk B., 1993, *Typologia i ocena bioklimatu Polski na podstawie bilansu cieplnego ciała człowieka*, Prace Geogr. IGiPZ, 160.

Krzyścin J.W., 1996, *UV controlling factors and trends derived from the ground-based measurements taken at Belsk, Poland, 1976–1994*, Jour. Geophys. Res. D: Atmospheres, vol. 101, no. 11, s. 16797–16805.

Kuchinke C., Nunez M., 1999, *Cloud transmission estimates of UVB erythemal irradiance*, Theor. Appl. Climatol., 63, 149–161.

Kuczmarska L., 1970, *O związku między całkowitym promieniowaniem słonecznym a czasem usłonecznienia w Polsce*, Wiad. Sł. Hydr. Met., t. 6, z. 2 (82), 51–55.

Kuczmarska L., Kuczmarski M., 1998, *Struktura usłonecznienia w Polsce*, Przegl. Geogr., 1/2, 101–110.

Kuczmarska L., Paszyński J., 1964a, *Przebieg roczny całkowitego promieniowania słonecznego w Polsce*, Przegl. Geofiz., z. 3/4, 275–279.

Kuczmarska L., Paszyński J., 1964b, *Rozkład promieniowania całkowitego na obszarze Polski*, Przegl. Geogr., 4, 691–702.

Kuczmarski M., 1977a, *Charakterystyka usłonecznienia północnych regionów Polski w okresie 1961–1970*, Zesz. Nauk. ART Olsztyn, Rolnictwo, 21, 127–133.

Kuczmarski M., 1977b, *Usłonecznienie w Polsce w lecie 1975 roku w aspekcie bioklimatycznym*, Dokumentacja Geograficzna IGiPZ, z. 4, 78–85.

Kuczmarski M., 1979, *Charakterystyka usłonecznienia południowych regionów Polski w okresie 1961–1970*, Dok. Geogr. IGiPZ, 2, 73–83.

Kuczmarski M., 1982, *Usłonecznienie w Polsce w okresie 1961–1970*, Czas. Geogr., t. 53, nr 2, 149–157.

Kuczmarski M., 1990, *Usłonecznienie Polski i jego przydatność dla helioterapii*, Dok. Geogr., 4.

Kuczmarski M., Paszyński J., 1981, *Zmienność dobowa i sezonowa usłonecznienia w Polsce*, Przegl. Geogr., 4, 779–791.

Kuziemska D., 1961, *O okresowości w makropogodzie*, Gaz. Obs. PIHM, t. 14, nr 11, 167.

Lamb H.H., 1982, *Climate, history and the modern world*, Methuen, London–New York.

Landsberg H.E., 1981, *The Urban Climate*, Academic Press.

Lewińska J., Zgud K., Baścik J., Wiatrak W., 1990, *Klimat obszarów zurbanizowanych*, IGPiK, Warszawa.

Liana F., 1955, *Pomiary promieniowania nadfiołkowego w Zakopanem i na Kasprowym Wierchu*, Przegl. Met. i Hyd., z. 3–4, 225–226.

Limanówka D., Ustrnul Z., 1993, *Changes of sunshine in the altitude profile of the Polish Western Carpathians*, Zesz. Nauk. UJ, 95, 115–124.

Lityńska Z., 2000, *Uwaga na promieniowanie ultrafioletowe Słońca*, Gaz. Obs IMGW, 2, 2.

Liu B.Y.H., Jordan R.C., 1960, *The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*, 4, 1–19.

Longstreth J., F.R. de Gruijl, Kripke M.L., Absek S., Arnold F., Slaper H.J., Velders G., Takizawa Y., J.C. van der Leun, 1998, *Health risks*, Jour. Photochem. Photobiol., B: Biology 46, 20–39.

Mackiewicz M., 1953, *Rozkład przestrzenny insolacji w Polsce*, Przegl. Met. i Hyd., z 1/2.

Mackiewicz M., 1957, *Promieniowanie słoneczne w Racioborzu*, Przegl. Geofiz., z. 1/2, 3–13.

Malcher J., Schönwiese CH.-D., 1987, *Homogeneity, spatial correlation and spectral variance analysis of long European and North American air temperature records*, Theor. App. Climatol., 38, 157–166.

Mann H.B., 1945, *Nonparametric test against trend*, Econometrica, t. 13, 245–259.

Marciniak K., Wójcik G., 1991, *The variation of sunshine duration in the middle part of northern Poland during the period 1946–1989*, Zesz. Post. Nauk. Roln., 396, 109–115.

Marsz A.A., Styszyńska A., 2001, *Oscylacja Północnego Atlantyku a temperatura powietrza nad Polską*, WSM, Gdynia.

Martinez-Lozano J.A., Casanovas A.J., 1994, *Comparison of global ultraviolet (290–385 nm) and global irradiation measured during the warm season in Valencia, Spain*, Int. J. Climatol., vol. 14, 93–102.

Martinez-Lozano J.A., Tena F., Utrillas P., 1996, *Measurement and analysis of ultraviolet solar irradiation in Valencia, Spain*, Int. J. Climatol., vol. 16, 947–955.

Martinez-Lozano J.A., Tena F., Utrillas P., 1999, *Ratio of UV global broad band irradiation in Valencia, Spain*, Int. J. Climatol., vol. 19, 903–911.

Martyn D., 1995, *Klimaty kuli ziemskiej*, Wydawnictwo Naukowe PWN.

Merecki R., 1915, *Klimatologia Ziem Polskich*, Drukarnia i Litografia Jana Cotty, Warszawa.

Miara K., Paszyński J., Grzybowski J., 1987, *Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski*, Przegl. Geogr., 4, 487–509.

Michalczewski J., 1953, *Zachmurzenie i usłonecznienie w Zakopanem*, Przegl. Met. i Hydr., z. 3/4, 227–233.

Mims F.M., Frederick J.E., 1994, *Cumulus clouds and UVB*, Nature, 371, 281–291.

Mitosek H., 1995, *Reflection of climate variability within the monthly mean time series of temperature in high mountains: a statistical approach*, Acta Geophysica. Polonica, t. 43, z. 1, 101–109.

Mitosek H., Strupczewski W., 1996, *Can series of maximal annual flow discharges be treated as realization of stationary processes?*, Acta Geophysica Polonica, vol. 61–77.

Monteith J.L., Unsworth M.H., 1988, *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold,

Morawska-Horawska M., 1963, *Zachmurzenie i usłonecznienie Krakowa w latach 1859–1958*, Prace PIHM, z. 81, Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa.

Morawska-Horawska M., 1984, *Współczesne zmiany w zachmurzeniu i usłonecznieniu Krakowa na tle 120-lecia*, Przegl. Geofiz., z. 3, 271–284.

Morawska-Horawska M., 1985, *Cloudiness and sunshine in Cracow, 1861–1980, and its contemporary tendencies*, J. Climatol., 5, 633–642.

Morawska-Horawska M., 2002, *Tendencje zachmurzenia i usłonecznienia Krakowa w latach 1861–1990. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń, 16–17 IX 1993*, 341–351.

Niedziałek H., 1981, *Całkowite promieniowanie słoneczne a masy powietrzne w Puławach w latach 1966–1975*, Przegl. Geofiz., z. 1/2, 85–94.

Offerle B., Grimmond S., Fortuniak K., Oke T., Kłysik K., 2002, *Analysis of long-term observations of urban surface-atmosphere energy exchange. Proc. 4th Symp. Urban. Env., May 2002*, Norfolk, 28–29.

Oke T., 1987, *Boundary layer climates*, Routledge, London–New York.

Olecki Z., 1973, *Wpływ miasta na niektóre elementy bilansu radiacyjnego na przykładzie Krakowa*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., z. 32, 105–118.

Olecki Z., 1975, *Oddziaływanie dużego ośrodka miejsko-przemysłowego na dopływ promieniowania słonecznego (na przykładzie Krakowa)*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., z. 41, 37–86.

Olecki Z., 1989, *Bilans promieniowania słonecznego w dorzeczu Górnej Wisły*, Rozprawy Habilitacyjne UJ, z. 157, Kraków.

Olecki Z., 1992, *Przezroczystość atmosfery w krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., z. 90, 25–32.

Olecki Z., 2002, *Krakowskie obserwacje heliograficzne i aktynometryczne w pracach Władysława Gorczyńskiego i współczesnych. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń, 16–17 IX 1993*, 139–145.

Parczewski W., 1957, *O współzależności miedzy rodzajami chmur a przebiegiem usłonecznienia*, Przegl. Geofiz., z. 4, 209–219.

Parczewski W., 1962, *O podziale roku w Polsce na porę chłodna i ciepłą*, Przegl. Geofiz., z. 2.

Paszyński J., 1959, *Wstępne wyniki badania przezroczystości atmosfery w Bydgoszczy*, Przegl. Geofiz., z. 2, 107–120.

Paszyński J., 1964, *Porównanie klimatu Parku w Świerklańcu i Wojewódzkiego Parku Kultury w Chorzowie. Badania klimatu lokalnego*, Dok. Geogr., z. 5, IG PAN, Warszawa.

Paszyński J., 1966, *Atlas bilansu promieniowania w Polsce. Materiały do bilansu cieplnego Polski*, Dok. Geogr., z. 4, IG PAN, Warszawa.

Paszyński J., Niedźwiedź T., 1991, *Klimat*, [w:] *Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Paszyński J., Rojan P., 1991, *The relationship between sunshine duration and structure of global solar radiation*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 396.

Pawlak Z., 1988, *Pomiar wielkości usłonecznienia za pomocą nowego typu heliografu*, Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, ser. A, 39.

Peterson, J.T., 1978, *Urban-rural solar radiation and atmospheric turbidity measurements in the Los Angeles Basin*, J. Appl. Meteorol., 17, 1595–1609.

Piwowarczyk J., 1992, *Wpływ rzeźby terenu na bezpośrednie promieniowanie słoneczne w Zakopanem*, Zesz. IGiPZ PAN, 6, 31–46.

Podogrocki J., 1977, *Zmienność czasowa promieniowania całkowitego w Polsce*, Zesz. Nauk. ART Olsztyn, Rolnictwo, 21, 113–125.

Podogrocki J., 1978, *Spatial distribution of global solar radiation in Poland*, Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-5 (120), 17–29.

Podogrocki J., 1982, *Struktura promieniowania całkowitego na przykładzie Warszawy. Mat. V Sem. Fitoaktynometrii*, IUNG, Puławy, 33–39.

Podogrocki J., 1992, *Wieloletnie zmiany usłonecznienia w Polsce, III Symp. nauk. „Klimat pola uprawnego"*, Puławy (streszczenia referatów).

Podogrocki J., 2002, *Z badań usłonecznienia w Warszawie. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń, 16–17 IX 1993*, 147–152.

Podogrocki J., http://www.ekologika.com.pl./nauka/konf_netmark/podogrocki.htm.

Podstawczyńska-Bienias A., 2000a, *Intensity of ultraviolet and total solar radiation in Łódź*, [w:] *Images and reconstructions of weather and climate over the last millennium*, Prace Geograficzne IG UJ, z. 108, Kraków, 73–80.

Podstawczyńska-Bienias A., 2000b, *Intensity of ultraviolet and total solar radiation in the city center – Łódź case study. 3rd European Conference on Applied Climatology „Tools for the environment and man of the year 2000", 16–20 October 2000*, Pisa, Italy.

Podstawczyńska-Bienias A., 2001, *Pomiary promieniowania ultrafioletowego i całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi na stacji meteorologicznej Zakładu Meteorologii i Klimatologii UŁ*, Ann. UMCS, ser. B, LV/LVI, 35, 285–292.

Podstawczyńska A., 2002, *Przebieg roczny najwyższych 10-minutowych wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego i promieniowania ultrafioletowego w Łodzi (na podstawie danych z lat 1997–2000)*, [w:] *Atlas Miasta Łodzi*, Plansza X – Klimat, Wyd. Urząd Miasta Łodzi, Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Łódź.

Podstawczyńska A., Fortuniak K., 1998, *Wstępne wyniki pomiarów całkowitego promieniowania krótkofalowego i promieniowania UV w Łodzi*, Acta Univ. Lodz., Folia Geogr. Phys., 3, 187–196.

Podstawczyńska A., Pawlak W., 2003, *Daily course of ultraviolet and total solar radiation in an urban canyon – Łódź case study. Proceedings of The Fifth International Conference on Urban Climate, 1–5 September 2003*, Łódź.

Pruchnicki J., 1987, *Metody opracowań klimatologicznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Raik A., Pahapiłł Ł., 1986, *Prodolżitelnost' solnecznogo sijanija kak vozmożnaja osnova klassifikacji pogod letnego perioda*, Mater. Met. Issled., 11, 70–71.

Robinson P.J., 1977, *Measurements of downwards scattered solar radiation from isolated Cumulus clouds*, J. Apply. Meteo., 16, 620–625.

Rojan P., 1995, *Wpływ urbanizacji i uprzemysłowienia na strukturę całkowitego promieniowania słonecznego*, Klimat i Bioklimat Miast, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 111–115.

Rottman G.J., 1983, *27-day variations in solar UV (120–300 nm) irradiance*, Planet Space Sci., vol. 31, no. 9, 1001–1007.

Sadler G.W., 1992, *Ultraviolet radiation at Edmonton, Alberta, Canada*, Solar Energy, 1, 13–17.

Schmuck A., 1959, *Zarys klimatologii Polski*, Wyd. PWN, Warszawa.

Segal M., Davis J., 1992, *The impact of deep Cumulus reflection on the ground-level global irradiance*, J. Apply. Meteo., 31, 217–222.

Słomka J., 1957, *Usłonecznienie we Wrocławiu*, Pr. Wrocł. Tow. Nauk., ser. B, nr 79, Wrocław.

Słomka J., 1988, *Ultraviolet and global solar radiation at Belsk 1980–1986*, Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-30 (220), 163–167.

Słomka J., Słomka K., 1993, *Biologically active solar UV radiation at Belsk in the years 1976–1992*, Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-40 (263), 71–81.

Słomka K., 1976, *Preliminary analysis of the effect of solar zenith distance, total ozone content, atmospheric turbidity and cloudiness on the solar UV radiation measured with a Robertson-Berger meter*, Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-3 (106), 39–47.

Słomka K., 1978, *UVB global radiation in Warsaw and Belsk*, Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc., D-7 (126), 121–131.

Słomka K., 1979, *Wpływ odległości zenitalnej Słońca, całkowitej zawartości ozonu, zmętnienia atmosfery i zachmurzenia na nadfioletowe promieniowanie słoneczne rejestrowane miernikiem Robertsona-Bergera w Belsku i Warszawie*, Probl. Uzdr., z. 9/10, 285–289.

Słomka K., Słomka J., 1992, *Życie w ultrafiolecie*, Wiedza i Życie, z. 8, 30–45.

Smosarski W., 1910, *Długość usłonecznienia w Warszawie*, Spraw. z Pos. Tow. Nauk. Warsz., t. 3, 235–246.

Sneyers R., 1963, *Sur la determination de la stabilite des series climatologiques*, [w:] *Changes of climate*, Arid Zone Research XX UNESCO, Paris.

Spencer I.W., 1971, *Fourier series representation of the position of the sun*, Search, 2.

Spinhirne J.D., Green A.E.S., 1978, *Calculation of relative influence of cloud layers on received ultraviolet and integrated solar radiation*, Atmos. Environ., 12, 2449–2454.

Stenz E., 1922, *Natężenie promieniowania słonecznego i insolacja w Warszawie według pomiarów w okresie 1913–1918*, Roczniki PIM, R. 1919, 14–38.

Stenz E., 1928, *Usłonecznienie Wielkopolski i Pomorza*, Kosmos, R. 53, 395–420.

Stenz E., 1929, *Zachmurzenie i usłonecznienie Karpat Wschodnich*, Kosmos, R. 54.

Stenz E., 1930, *O rozkładzie geograficznym usłonecznienia w Polsce*, Kosmos, R. 55, 516–532.

Stenz E., 1936, *O usłonecznieniu w Warszawie*, Wiad. Met. i Hydr., R. 16.

Stenz E., 1926, *O stosunkach słonecznych w Czarnohorze*, Pol. Gaz. Lek., t. 5.

Tablice słoneczne do użytku obserwatorów stacji aktynometrycznych, 1976, Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa.

Taylor H.R., West S.K., Rosenthal F.S., Munos B., Newland H.S., Emmet E.A., 1989, *Corneal changes associated with chronic UV irradiation*, Arch. Opthalmol., 107, 1481.

Terjung W.H., Louie S. S.-F., 1973, *Solar radiation and urban heat island*, Ann. Ass. Am. Geogr., 63, 181–207.

Thekaekara M.P., 1971, *Solar energy outside the earth's atmosphere*, Solar Energy, 14, 109–127.

Trepińska J., 1992, *Cykle aktywności Słońca – cykle klimatyczne – cykliczność w przebiegu ciśnienia i temperatury powietrza w Europie*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 90, 7–21.

Trybowski Cz., 1955, *Zachmurzenie i usłonecznienie Rabki*, Wiad. Sł. Hydr. i Met., 5, 3–15.

Tyczka S., 1964, *Przebieg usłonecznienia w Inowrocławiu i Kołobrzegu*, Wiad. Uzdr., 2/3, 45–53.

Vanicek K., Frei T., Lityńska Z., Schmalwieser A., 2000, *UV-Index for the public. A guide for publication and interpretation of solar UV index forecasts for the public prepared by the Working Group 4 of the COST–713 Action 'UVB Forecasting'*, COST-713, Brussels, 1–27.

Visser S., 1949, *Heat waves of the year 1947 and solar activity*, Quart J. R. Met. Soc., vol. 75.

Webb A.R., 1991, *Solar ultraviolet radiation in Southeast England: the case for spectral measurements*, Photochem. Photobiol., 5, 789–794.

Weber G.R., 1990, *Spatial and temporal variation of sunshine in the Federal Republic of Germany*, Theor. Appl. Climatol., 41, 1–9.

Wibig J., 2001, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na rozkład przestrzenny anomalii temperatury i opadów w Europie*, Rozprawy Habilitacyjne Uniwersytetu Łódzkiego, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.

Wibig J., 2002, *Cloudiness variability in Łódź between 1931 and 2000. Proceeding of International Conference on Climatology „Man and climate in the 20th century", 13–15 czerwca 2002*, Wrocław.

Wibig J., 2004, *Long-term variability of cloudiness and its relation to precipitation on the example of Łódź*, Materiały Instytutu Geofizyki PAN (w druku).

Witiels L., 1959, *Sołniecznaja aktivnost', prieobrazowanija form atmosfiernoj cyrkulacji I wnutrimiesiacznyje kolebanija tiempieratury*, Trudy GGO, t. 87.

Witinskij I., Sazonow B., 1976, *Sołnce i atmosfiera Ziemli*, Gidromieteoizdat, Leningrad.

Woś A., *Zarys klimatu Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Wójcik A., 1971, *O wartościach bezpośredniego promieniowania słonecznego w warunkach atmosfery silnie zanieczyszczonej na przykładzie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego*, Zesz. Nauk. Uniw. M. Kopernika w Toruniu, Nauki Mat.-Przyr., 26, 121–132.

Wójcik G., Marciniak K., 1993a, *The beginning of observations of sunshine duration in Poland*, Zesz. Nauk. UJ, Prac. Geogr., z. 95, 101–106.

Wójcik G., Marciniak K., 1993b, *Usłonecznienie w Polsce północno-zachodniej w okresie 1961–1980*, AUNC, Geografia, t. 24, z. 82, 1–26.

Zakrent S., 1955, *Wyniki pomiarów natężenia promieniowania słonecznego w Zakopanem i na Kasprowym Wierchu*, Przegl. Met. Hydr., 3/4, 219–224.

Zavodska E., Reichrt J., 1985, *Ultraviolet and total global radiation in Bratislava*, Contrib. Slovak Acad. Sci. Ser. Meteorol., 5, 21.

Zawadzka A., 1971, *Usłonecznienie i zachmurzenie w Polanicy Zdroju*, Zesz. Nauk. UŁ, ser. II, z. 43.

Ziemke J.R., Herman J.R., Stanford J. L., Bartia P.K., 1998, *Total ozone/UVB monitoring and forecasting: Impact of clouds and horizontal resolution of satellite retrievals*, J. Geophys. Res., 103, 3865–3871.

Zinkiewicz W., 1962, *Usłonecznienie względne Polski*, Ann. Univ. M. Curie-Skłod., Lublin, ser. B, 10, 241–275.

Żmudzka E., 1995, *Tendencje i cykle zmian temperatury powietrza w Polsce w latach 1951–1990*, Przegl. Geofiz., t. 40, z. 2, 129–140.

SPIS TABEL

Tabela 4.1.1. Masa optyczna atmosfery wg formuły Kastena (1966) w poszczególnych przedziałach wysokości Słońca nad horyzontem (H_s) 46

Table 4.1.1. Optical air masses by Kasten formula (1966) in particular intervals of the Sun height above horizon (H_s). 46

Tabela 4.1.2. Kulminacja Słońca nad horyzontem (H_s), długość dnia (D_L), natężenie i suma dobowa całkowitego (D_{t0}) i ultrafioletowego (UVA + UVB, D_{uv0}) promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery dla 15. dnia miesiąca 46

Table 4.1.2. The Sun culmination above horizon (H_s), the day length (D_L), the intensity and the daily sum of total (D_{t0}) and ultraviolet (UVA + UVB, D_{uv0}) solar radiation on the upper limit of the atmosphere on 15th day in every month . . . . . .

Tabela 4.3.1. Średnie roczne stężenia dwutlenku siarki na dobę (SO_2, w ($\mu g/m^3$) w wybranych latach w centrum Łodzi (stacja przy ul. Zachodniej 81) (Kłysik, Fortuniak 1999) 50

Table 4.3.1. The annual mean of sulphur dioxide concentration per day (SO_2, in ($\mu g/m^3$) in selected years in the center of Łódź (Zachodnia 81 street) (Kłysik, Fortuniak 1999) 50

Tabela 4.3.2. Średnie miesięczne i roczne stężenia SO_2 na dobę (w ($\mu g/m^3$) w centrum Łodzi (stacja przy ul. Zachodniej 81) w latach 1993–1997 (Kłysik, Fortuniak 1999) 50

Table 4.3.2. The monthly and the annual mean of sulphur dioxide concentration per day (in ($\mu g/m^3$) in the center of Łódź (Zachodnia 81 street) in the period 1993–1997 (Kłysik, Fortuniak 1999) 50

Tabela 5.1.1. Średnie, najwyższe i najniższe sumy miesięczne, sezonowe i roczne usłonecznienia rzeczywistego (godz.) i względnego (%, wartości w nawiasach) w Łodzi w latach 1951–2000 53

Table 5.1.1. The mean, the highest and the lowest monthly, seasonal and annual totals of actual sunshine duration (in hour) and relative sunshine duration (in %, values in brackets) in Łódź in the period 1951–2000 . . . 53

Tabela 5.1.2. Średnie wartości usłonecznienia rzeczywistego (godz.) i względnego (%) dla Polski i Łodzi z lat 1951–1975 54

Table 5.1.2. The mean values of actual sunshine duration (in hour) and relative sunshine duration (in %) in Poland and Łódź in the period 1951–1975 54

Tabela 5.1.3a. Usłonecznienie w Łodzi w kolejnych dniach w okresie od I do VI w latach 1951–2000 (g – średnie sumy dobowe w godz, % – średnie dobowe usłonecznienie względne, max g — najwyższe dobowe usłonecznienie w 50-leciu w godz., max % – najwyższe dobowe usłonecznienie względne w 50-leciu). Pola zacienione oznaczają wartości powyżej średniej dla danego miesiąca 56

Table 5.1.3a. The sunshine duration in Łódź in successive days in the term from I to VI in the period 1951–2000 (g – the mean daily totals in hours, % – the mean daily values of relative sunshine duration, max g – the daily maximum of sunshine duration in 50-year period (in hour), max % – the daily maximum of relative sunshine duration in 50-year period). The values above monthly average are shaded 56
Tabela 5.1.3b. Usłonecznienie w Łodzi w kolejnych dniach w okresie od VII do XII w latach 1951–2000 (g – średnie sumy dobowe w godz, % – średnie dobowe usłonecznienie względne, max g — najwyższe dobowe usłonecznienie w 50-leciu w godz., max % – najwyższe dobowe usłonecznienie względne w 50-leciu). Pola zacienione oznaczają wartości powyżej średniej dla danego miesiąca 58
Table 5.1.3b. The sunshine duration in Łódź in successive days in the term from VII to XII in the period 1951–2000 (g – the mean daily totals in hours, % – the mean daily values of relative sunshine duration, max g – the daily maximum of sunshine duration in 50-year period (in hour), max % – the daily maximum of relative sunshine duration in 50-year period). The values above monthly average are shaded 58
Tabela 5.1.4. Średnie roczne sumy usłonecznienia rzeczywistego (w godz.) w Łodzi w dekadach wielolecia 1951–2000 60
Table 5.1.4. The mean annual totals of actual sunshine duration (in hour) per decades in Łódź in the period 1951–2000 60
Tabela 5.1.5. Trendy liniowe sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego i względnego oraz wartości statystyki progresywnej $U(a)$ testu Mann-Kendalla dla usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 73
Table 5.1.5. The linear trends of monthly, seasonal and annual totals of actual and relative sunshine duration and the values of the progressive (forward) statistic $U(a)$ of Mann-Kendall test for actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 73
Tabela 5.1.6. Trend liniowy sum miesięcznych usłonecznienia w wybranych przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000 76
Table 5.1.6. The linear trend of monthly totals of sunshine duration in selected hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000 76
Tabela 5.1.7. Podstawowe charakterystyki statystyczne sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 76
Table 5.1.7. The basic statistical characteristics of the monthly, the seasonal and the annual totals of actual sunshine duration in the period 1951–2000 . . 76
Tabela 5.1.8. Frekwencja odchyleń sum miesięcznych, sezonowych i rocznych usłonecznienia rzeczywistego od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000 80
Table 5.1.8. The frequency of the deviations of monthly, seasonal and annual totals of actual sunshine duration from mean value for the period 1951–2000 in Łódź 80
Tabela 5.2.1. Średnie miesięczne i roczne sumy usłonecznienia w przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000 88
Table 5.2.1. The monthly and the annual mean of sunshine duration in hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000 88
Tabela 5.2.2. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000 89

Table 5.2.2. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 89
Tabela 5.2.3. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–1975 92
Table 5.2.3. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1951–1975 92
Tabela 5.2.4. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1976–2000 93
Table 5.2.4. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1976–2000 93
Tabela 5.2.5. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–1960 98
Table 5.2.5. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1951–1960 98
Tabela 5.2.6. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1961–1970 99
Tabela 5.2.6. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1961–1970 99
Tabela 5.2.7. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1971–1980 100
Table 5.2.7. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1971–1980 100
Tabela 5.2.8. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1981–1990 101
Table 5.2.8. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1981–1990 101
Tabela 5.2.9. Przebieg dzienny średnich godzinnych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1991–2000 102
Table 5.2.9. Daily course of the mean hourly totals of sunshine duration in Łódź in the period 1991–2000 102
Tabela 5.2.10a. Trendy godzinnych wartości usłonecznienia (godz. 3.00–12.00) w Łodzi w latach 1951–2000 103
Table 5.2.10a. The linear trends of hourly values of sunshine duration (3.00 a.m.–12.00 a.m.) in Łódź in the period 1951–2000 103
Tabela 5.2.10b. Trendy godzinnych wartości usłonecznienia (godz. 12.00–21.00) w Łodzi w latach 1951–2000 104
Table 5.2.10b. The linear trends of hourly values of sunshine duration (12.00 a.m.–21.00 p.m.) in Łódź in the period 1951–2000 104
Tabela 5.3.1. Rozkład dni (w % danego miesiąca, sezonu, roku) w pięciu klasach usłonecznienia możliwego w Łodzi w latach 1951–2000 110
Table 5.3.1. The days distribution (in % of a month, a season, a year) in five classes of possible sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 110
Tabela 5.3.2. Dni z usłonecznieniem powyżej średniej w % danego miesiąca, pory roku i roku w Łodzi w latach 1951–2000 115
Table 5.3.2. The days with sunshine duration above average in % of the month, the season and the year in Łódź in the period 1951–2000 115
Tabela 5.3.3. Trendy liniowe sum miesięcznych, sezonowych i rocznych dni w pięciu klasach usłonecznienia możliwego 117
Table 5.3.3. The linear trends of the monthly, the seasonal and the annual totals of the days in five classes of possible sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 117

Tabela 5.3.4. Wartość statystyki progresywnej testu Mann-Kendalla dla dni bezsłonecznych i bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 118
Table 5.3.4. The values of the progressive (forward) statistic of Mann-Kendall test for sunless and very sunny days in Łódź in the period 1951–2000 118
Tabela 5.3.5. Liczba co najmniej 5-dniowych ciągów dni bezsłonecznych w Łodzi w wieloleciu i poszczególnych dekadach okresu 1951–2000 122
Table 5.3.5. The number of sunless 5-day terms at the least in long-term period and in particular decades in 1951–2000 in Łódź 122
Tabela 5.3.6. Frekwencja zwartych okresów bezsłonecznych w Łodzi w wieloleciu i poszczególnych dekadach okresu 1951–2000 123
Table 5.3.6. The frequency of sunless terms in Łódź in long-term period and in particular decades in 1951–2000 123
Tabela 6.2.1. Sumy miesięczne i roczne całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa (M_t, M_{uv}) i na górnej granicy atmosfery (M_{t0}, M_{uv0}) oraz wartości współczynnika transmisji promieniowania (T_t, T_{uv}) w latach 1997–2001 129
Table 6.2.1. The monthly and annual sums of UV and total solar radiation at the ground level at Łódź-Lipowa station (M_t, M_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (M_{t0}, M_{uv0}) and the values of transmission coefficient of solar radiation in the period 1997–2001 129
Tabela 6.2.2. Sumy roczne, sezonowe i miesięczne całkowitego promieniowania słonecznego (MJm^{-2}) oraz udział sum sezonowych i miesięcznych w sumie rocznej (%) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 132
Table 6.2.2. The annual, seasonal and monthly sums of total solar radiation (MJm^{-2}) and the contribution of seasonal and monthly sums in annual sums (in %) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 132
Tabela 6.2.3. Sumy roczne, sezonowe i miesięczne promieniowania ultrafioletowego (MJm^{-2}) oraz udział sum sezonowych i miesięcznych w sumie rocznej (%) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 133
Table 6.2.3. The annual, seasonal and monthly sums of UV solar radiation (MJm^{-2}) and the contribution of seasonal and monthly sums in annual sums (in %) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 133
Tabela 6.2.4. Podstawowe charakterystyki statystyczne sum dobowych promieniowania całkowitego (D_t, MJm^{-2}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Sumy dobowe promieniowania całkowitego w Łodzi w latach 1956–1975 wg Miara, Paszyński, Grzybowski (1987). Sumy dobowe promieniowania całkowitego na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, MJm^{-2}) na szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa 140
Table 6.2.4. The basic statistical characteristics of the daily sums of total solar radiation (D_t, MJm^{-2}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. The daily sums of total solar radiation in Łódź in the period 1956–1975 by Miara, Paszyński, Grzybowski (1987). The daily sums of total solar radiation on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, MJm^{-2}) on the latitude of Łódź-Lipowa station 140
Tabela 6.2.5. Podstawowe charakterystyki statystyczne sum dobowych promieniowania ultrafioletowego (D_{uv}, MJm^{-2}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Sumy dobowe promieniowania ultrafioletowego na górnej granicy atmosfery (D_{uv0}, MJm^{-2}) na szerokości geograficznej stacji Łódź-Lipowa 141
Table 6.2.5. The basic statistical characteristics of the daily sums of UV solar radiation (D_{uv}, MJm^{-2}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001.

The daily sums of UV solar radiation on the upper limit of the atmosphere (D_{uv0}, MJm^{-2}) on the latitude of Łódź-Lipowa station . . 141
Tabela 6.2.6. Średnie i ekstremalne wartości współczynnika transmisji sum dobowych całkowitego (T_t, %) i ultrafioletowego (T_{uv}, %) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 147
Table 6.2.6. The mean and the extreme of the transmission coefficient values of the daily sums of total (T_t, %) and UV (T_{uv}, %) solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 147
Tabela 6.3.1. Wartości albedo dla różnych rodzajów chmur (wg Kędziora 1995) . . 156
Table 6.3.1. The albedo values for different types of clouds (by Kędziora 1995) 156
Tabela 6.3.2. Osłabienie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego (w %) w zależności od rodzaju chmur (zachmurzenie całkowite) i wysokości Słońca nad horyzontem (H_s°) w stosunku do warunków bezchmurnego nieba wg Kondratiewa (1965) 157
Table 6.3.2. The attenuation of the intensity of total solar radiation (in %) in dependence of type of clouds (overcast sky) and the Sun height (H_s°) in relation to cloudless sky condition by Kondratiew (1965) 157
Tabela 6.3.3. Transmisja promieniowania UVB (stosunek natężenia promieniowania UVB w warunkach zachmurzenia do natężenia w dzień bezchmurny) dla wybranych rodzajów chmur (wg Kuchinke i Nunez 1999) 158
Table 6.3.3. The transmission of UVB radiation (the ratio of UVB intensity during overcast sky to UVB intensity during clear sky) for selected cloud types (by Kuchinke i Nunez 1999) 158
Tabela 6.3.4. Średnie miesięczne natężenie promieniowania całkowitego (Wm^{-2}) w przedziałach godzinnych na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 . . . 164
Table 6.3.4. The mean monthly intensity of total solar radiation (Wm^{-2}) in hourly intervals at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 164
Tabela 6.3.5. Średnie miesięczne natężenie promieniowania ultrafioletowego (Wm^{-2}) w przedziałach godzinnych na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 165
Table 6.3.5. The mean monthly intensity of UV solar radiation (Wm^{-2}) in hourly intervals at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 165
Tabela 6.4.1. Współczynniki równania regresji liniowej ($y = a + bx$) i ich charakterystyki statystyczne dla sum dobowych ultrafioletowego (zmienna zależna) i całkowitego promieniowania słonecznego (zmienna niezależna) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 167
Table 6.4.1. The coefficients of linear regression equation ($y = a + bx$) and the statistical characteristics for the daily sums of UV (dependent variable) and total solar radiation (independent variable) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 167
Tabela 6.4.2. Udział natężenia promieniowania UV w natężeniu promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) w warunkach bezchmurnego nieba w przedziałach wysokości Słońca (H_s) i masy optycznej atmosfery (m) w Łodzi w latach 1997–2001 169
Table 6.4.2. The ratio of UV intensity to total solar radiation intensity ($R_{uv/t}$, %) during cloudless sky in the intervals of the Sun height (H_s) and the optical air masses (m) in Łódź in the period 1997–2001 169
Tabela 6.4.3. Charakterystyki statystyczne udziału procentowego sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) obliczonego dla wszystkich dni (bezchmurnych i pochmurnych) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 172

Table 6.4.3. The statistical characteristics of the ratio of the ultraviolet daily sums to the total solar radiation daily sums ($R_{uv/t}$, %) calculated for the all days (cloudless and cloudy) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 172
Tabela 6.4.4. Udział procentowy sumy dobowej promieniowania UV w sumie dobowej promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) w dniach bezchmurnych w Łodzi w latach 1997–2001 173
Table 6.4.4. The ratio of the ultraviolet daily sum to the total solar radiation daily sum ($R_{uv/t}$, %) in cloudless days in Łódź in the period 1997–2001 . . 173
Tabela 7.1.1. Sumy roczne całkowitego promieniowania słonecznego i ich różnice między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000 i 2001 182
Table 7.1.1. The annual sums of total solar radiation and the differences between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in years: 1998, 2000, 2001 182
Tabela 7.1.2. Średnie oraz najwyższe średnie różnice sum dobowych promieniowania całkowitego (w %) między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001 183
Table 7.1.2. The mean and the highest mean differences of the daily sums of total solar radiation (in %) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in years: 1998, 2000, 2001 183
Tabela 7.1.3. Średnie różnice sum dobowych promieniowania całkowitego (w MJm^{-2}) między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001 184
Table 7.1.3. The mean differences of the daily sums of total solar radiation (in MJm^{-2}) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in years: 1998, 2000, 2001 184
Tabela 7.2.1. Sumy dobowe całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego na stacjach Lublinek i Lipowa w okresie 11 VI–4 VII 2002 . . 188
Table 7.2.1. The daily sums of total and UV solar radiation at Lublinek and at Lipowa stations in the period 11 June–4 July 2002 188
Tabela 7.2.2. Średnie dobowe wartości prężności pary wodnej (*e*), udziału sum godzinnych promieniowania UV w sumach godzinnych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$) oraz różnic miedzy stacją Lipowa a Lublinek w okresie 11 VI–4 VII 2002 190
Table 7.2.2. The mean daily values of water vapour pressure (*e*), the ratio of hourly sums of UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) and the differences between Lipowa and Lublinek station in the period 11 June–4 July 2002 . . . 190
Tabela 8.1.1. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) w formule Blacka dla Polski wg Podogrockiego 199
Table 8.1.1. The values of regression coefficients (*a*, *b*) of Black's formula for Poland by Podogrocki 199
Tabela 8.1.2. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) w formule Blacka zastosowanej do szacowania sum dobowych ultrafioletu wg Sadlera (1992) . . . 201
Table 8.1.2. The values of regression coefficients of Black's formula apply to estimate the daily values of ultraviolet by Sadler (1992) 201
Tabela 8.2.1. Wartości współczynników regresji (*a*, *b*) dla Łodzi do szacowania sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego i ich charakterystyki statystyczne 203

Table 8.2.1. The values of regression coefficients (a, b) for Łódź to estimate the daily values of total solar radiation and the statistical characteristics 203

Tabela 8.2.2. Odchylenia sum miesięcznych całkowitego promieniowania słonecznego wyznaczonych dla Łodzi wg formuły Blacka z zastosowaniem nowych współczynników regresji dla Łodzi (M_{t_teor1}, MJm^{-2}) i współczynników regresji dla Polski wg J. Podogrockiego (M_{t_teor2}, MJm^{-2}) od wartości rzeczywistych (M_{t_rzecz}, MJm^{-2}) w latach 1991–1998. Współczynnik transmisji promieniowania całkowitego dla wartości rzeczywistych (T_{t_r}) i teoretycznych wg Podogrockiego (T_{t_teor2}) 205

Table 8.2.2. The deviations of the theoretical monthly sums of total solar radiation calculated for Łódź by means of Blacks' formula with the new regression coefficient for Łódź (M_{t_teor1}, MJm^{-2}) and the regression coefficient for Poland by Podogrocki (M_{t_teor2} , MJm^{-2}) from empirical values (M_{t_rzecz}, MJm^{-2}) in the period 1991–1998. The transmission coefficient of total solar radiation for the empirical (T_{t_r}) and the theoretical values by Podogrocki (T_{t_teor2}) 205

Tabela 8.2.3. Odchylenia względne (%) rzeczywistych sum miesięcznych i rocznych promieniowania całkowitego od wartości teoretycznych wg formuły Blacka z zastosowaniem współczynników regresji dla Łodzi (M_{t_teor1}) i dla Polski (wg Podogrockiego) (M_{t_teor2}). Błąd estymacji modelu regresji dla Łodzi w % (Sig_e) 206

Table 8.2.3. The relative deviations (%) of the empirical monthly and annual sums of total solar radiation from theoretical values calculated by means of Black's formula with the new regression coefficient for Łódź (M_{t_teor1}) and for Poland (by Podogrocki) (M_{t_teor1}). The estimation error of regression model for Łódź (in %) (Sig_e) 206

Tabela 8.3.1. Wartości współczynników regresji (a, b) dla Łodzi do szacowania sum dobowych ultrafioletowego promieniowania słonecznego i ich charakterystyki statystyczne 207

Table 8.3.1. The values of regression coefficients (a, b) for Łódź to estimate the daily values of UV solar radiation and the statistical characteristics 207

Tabela 8.3.2. Odchylenia sum miesięcznych promieniowania ultrafioletowego w Łodzi wyznaczonych wg formuły Blacka, M_{uv_teor} (MJm^{-2}), od wartości rzeczywistych, M_{uv_rzecz} (MJm^{-2}), w latach 1997–2000. Współczynnik transmisji ultrafioletu (T_{uv}) 208

Table 8.3.2. The deviations of the theoretical monthly sums of UV solar radiation calculated for Łódź by means of Blacks' formula M_{uv_teor} (MJm^{-2}), from empirical values M_{uv_rzecz} (MJm^{-2}), in the period 1997–2000. The transmission coefficient of UV solar radiation (T_{uv}) 208

Tabela 8.3.3. Błędy standardowe estymacji modelu regresji liniowej (w %) do szacowania sum energii ultrafioletu na podstawie usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1997–2000 209

Table 8.3.3. The estimation standard errors of the linear regression model (in %) apply to estimation of the UV energy sums on the basis of relative sunshine duration in Łódź in the period 1997–2000 209

Tabela I. Sumy miesięczne usłonecznienia rzeczywistego (godz.) w Łodzi w latach 1951–2000 216

Table I. The monthly totals of actual sunshine duration (in hour) in Łódź in the period 1951–2000 216

Tabela II. Sezonowe sumy usłonecznienia rzeczywistego (godz.) i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 219
Table II. The seasonal totals of actual sunshine duration (in hour) and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000 219
Tabela III. Sumy dobowe usłonecznienia rzeczywistego (godz.) w Łodzi w latach 1951–2000 222
Table III. The daily totals of actual sunshine duration (in hour) in Łódź in the period 1951–2000 222
Tabela IV. Usłonecznienie względne w Łodzi w latach 1951–2000 225
Table IV. The relative sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 . . . 225
Tabela V. Miesięczna i roczna liczba dni bezsłonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 228
Table V. The monthly and the annual number of sunless days in Łódź in the period 1951–2000 228
Tabela VI. Sezonowa liczba dni bezsłonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 231
Table VI. The seasonal number of sunless days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000 231
Tabela VII. Miesięczna i roczna liczba dni umiarkowanie słonecznych (25,1–50% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000 234
Table VII. The monthly and the annual number of moderately sunny days (25.1–50% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000 . . . 234
Tabela VIII. Sezonowa liczba dni umiarkowanie słonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 237
Table VIII. The seasonal number of moderately sunny days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000 237
Tabela IX. Miesięczna i roczna liczba dni pochmurnych (0,1–25% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000 240
Table IX. The monthly and the annual number of cloudy days (0.1–25% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000 240
Tabela X. Sezonowa liczba dni pochmurnych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 243
Table X. The seasonal number of cloudy days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000 243
Tabela XI. Miesięczna i roczna liczba dni słonecznych (50,1–75% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000 246
Table XI. The monthly and the annual number of sunny days (50.1–75% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000 246
Tabela XII. Sezonowa liczba dni słonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 249
Table XII. The seasonal number of sunny days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000 249
Tabela XIII. Miesięczna i roczna liczba dni bardzo słonecznych (powyżej 75% usłonecznienia możliwego) w Łodzi w latach 1951–2000 252
Table XIII. The monthly and the annual number of very sunny days (above 75% of possible sunshine duration) in Łódź in the period 1951–2000 252
Tabela XIV. Sezonowa liczba dni bardzo słonecznych i ich udział (%) w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 255
Table XIV. The seasonal number of very sunny days and the contribution (in %) in annual total in Łódź in the period 1951–2000 255

Tabela XV. Średnie 10–minutowe natężenie całkowitego promieniowania słonecznego (I_t) większe lub równe 1000 Wm^{-2} i synchroniczne wartości natężenia ultrafioletowego promieniowania słonecznego (I_{uv}, Wm^{-2}) oraz wielkość i rodzaj zachmurzenia nieba na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 258

Table XV. The mean 10-minute intensity of total solar radiation (I_t) equal or above 1000 Wm^{-2} and the synchronous values of intensity of UV solar radiation (I_{uv}, Wm^{-2}) and amount and type of cloudiness at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 258

SPIS RYCIN

Ryc. 2.1.1. Fotografia wieży aktynometrycznej w ogródku meteorologicznym stacji IMGW Łódź-Lublinek – miejsce lokalizacji heliografu i pyranometru (wyk. A. Podstawczyńska, 2003) 25

Fig. 2.1.1. The photography of the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station (Institute of Meteorology and Water Management station) – the location site of heliograph and pyranometer (photo by A. Podstawczyńska, 2003) 25

Ryc. 2.1.2. Fotografie heliografu na wieży aktynometrycznej stacji IMGW Łodź--Lublinek (wyk. A. Podstawczyńska, 2003) 26

Fig. 2.1.2. The photography of Campbell-Stokes heliograph on the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station (Institute of Meteorology and Water Management station) (photo by A. Podstawczyńska, 2003) 26

Ryc. 2.1.3. Przesłonięcie horyzontu dla heliografu na stacji Łódź-Lublinek i łuki dzienne słońca dla wybranych dni na szerokości geograficznej $\varphi = 51°44'N$: 1 – 1974, lokalizacja w ogródku meteorologicznym na wieży aktynometrycznej na wysokości 5 m n.p.g.; 2 – 1988, lokalizacja na wieży budynku aeroklubu na wysokości 9,35 m n.p.g. (wg danych Działu Służby IMGW) 28

Fig. 2.1.3. The horizon obstruction of the heliograph at Łódź-Lublinek station and the Sun paths in selected days on latitudes $\varphi = 51°44'N$: 1 – 1974, the location on the actinometrical tower, 5 m above the ground level; 2 – 1988, the location on the tower of Flying Club building, 9.35 m above the ground level (according to the data of Institute of Meteorology and Water Management) 28

Ryc. 2.1.4. Fotografia przesłonięcia horyzontu dla heliografu zlokalizowanego na wieży aktynometrycznej w ogródku meteorologicznym IMGW Łódź--Lublinek wykonana obiektywem typu „rybie oko" (wyk. A. Podstawczyńska, 2003) 28

Fig. 2.1.4. The „fish eye" photography of the horizon obstruction of the heliograph set on the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station (photo by A. Podstawczyńska, 2003) 28

Ryc. 2.2.1. Fotografia przesłonięcia horyzontu dla mierników promieniowania słonecznego wykonana obiektywem typu „rybie oko" na stacji Łódź-Lipowa i Łódź-Lublinek (wyk. A. Podstawczyńska, 2003) 31

Fig. 2.2.1. The „fish eye" photographs of the horizon obstruction of the solar radiation meters at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations (photo by A. Podstawczyńska, 2003) 31

Ryc. 2.2.2. Lokalizacja mierników promieniowania słonecznego na dachu budynku Instytutu Nauk o Ziemi UŁ przy ul. Lipowej 81 w Łodzi 31

Fig. 2.2.2. The location of the solar radiation meters on the roof of the Institute of the Earth Science's building at Lipowa 81 street in Łódź 31

Ryc. 2.2.3. Ażurowa ława z miernikami promieniowania słonecznego na dachu budynku Instytutu Nauk o Ziemi UŁ przy ul. Lipowej 81 i jej otoczenie w obiektywie „rybie oko" 32
Fig. 2.2.3. The „fish eye" photography of the openwork bench with solar radiation meters and its surroundings on the roof of the Institute of the Earth Science's building at Lipowa 81 street 32
Ryc. 2.2.4. Mierniki całkowitego promieniowania słonecznego (CM11) i ultrafioletu (CUV3) firmy Kipp & Zonen na stacji Łódź-Lipowa 32
Fig. 2.2.4. The meters of total solar radiation (CM11) and ultraviolet radiation (CUV3) by Kipp & Zonen at Łódź-Lipowa station 32
Ryc. 2.2.5. Pyranometr CM11 na wieży aktynometrycznej stacji IMGW Łódź-Lublinek 32
Fig. 2.2.5. Pyranometer CM11 on the actinometrical tower at Łódź-Lublinek station 32
Ryc. 4.1.1. Przebieg roczny kulminacji słońca nad horyzontem (H_s) i długość dnia dla szerokości geograficznej Łodzi 46
Fig. 4.1.1. Annual course of the solar zenith angle and the days length on the latitude of Łódź 46
Ryc. 4.2.1. Roczny przebieg zachmurzenia oraz częstość dni pogodnych i pochmurnych w Łodzi. Wartości z trzech terminów obserwacyjnych: godz. 7.00, 13.00, 19.00 (Fortuniak, Wibig 2002) 47
Fig. 4.2.1. Annual course of the cloudiness and the frequency of sunny and cloudy days in Łódź. The values at three observation terms: 7.00 a.m., 13.00 p.m., 19.00 p.m. Legend: large bars – cloudy days; small bars – clear days; bold line – mean cloudiness at three observation terms: 7.00 a.m., 13.00 p.m., 19.00 p.m.; line – mean cloudiness at 13.00 p.m. (Fortuniak, Wibig 2002) 47
Ryc. 4.3.1. Przebieg roczny średnich miesięcznych stężeń dwutlenku siarki na dobę w centrum Łodzi (stacja przy ul. Zachodniej 81) w latach 1993–1997 (wg danych Kłysik, Fortuniak 1999) 50
Fig. 4.3.1. Annual course of the monthly mean values of sulphur dioxide concentration per day in the center of Łódź (Zachodnia 81 street) in the period 1993–1997 (by the values of Kłysik, Fortuniak 1999) 50
Ryc. 5.1.1. Przebieg roczny średnich (a), najwyższych (b) i potencjalnych (c) sum dobowych usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 . . 55
Fig. 5.1.1. Annual course of the mean (a), the maximum (b) and the potential (c) daily totals of actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 . . . 55
Ryc. 5.1.2. Przebieg roczny średnich i najwyższych dobowych wartości usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1951–2000 55
Fig. 5.1.2. Annual course of the mean and the maximum daily values of relative sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 55
Ryc. 5.1.3. Histogram sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 61
Fig. 5.1.3. Histogram of the annual totals of actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 61
Ryc. 5.1.4. Roczne sumy usłonecznienia rzeczywistego w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana 63
Fig. 5.1.4. Annual totals of the actual sunshine duration as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź (bars). 5-year running average (solid line) and trend (dashes line) 63
Ryc. 5.1.5. Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznych sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 . . . 63

Fig. 5.1.5. Course of the sequence values of Mann-Kendall test for annual totals of the actual sunshine duration. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$ 63
Ryc. 5.1.6. Przebieg sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Puławach i Łodzi w latach 1951–1992 66
Fig. 5.1.6. Course of the annual totals of actual sunshine duration in Puławy and Łódź in the period 1951–2000 66
Ryc. 5.1.7. Przebieg sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego w Warszawie-Bielany i Łodzi w latach 1951–2000 66
Fig. 5.1.7. Course of the annual totals of actual sunshine duration in Warszawa-Bielany and Łódź in the period 1951–2000 66
Ryc. 5.1.8. Sezonowe sumy usłonecznienia rzeczywistego w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana 67
Fig. 5.1.8. The seasonal totals of actual sunshine duration as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź (bars). 5-year running average (solid line) and trend (dashes line) 67
Ryc. 5.1.9. Udział procentowy sum sezonowych usłonecznienia w sumie rocznej w Łodzi w latach 1951–2000 69
Fig. 5.1.9. The contribution of seasonal totals of actual sunshine duration (in per cents) in the annual totals in Łódź in the period 1951–2000 69
Ryc. 5.1.10. (a) Sumy usłonecznienia rzeczywistego w maju i we wrześniu w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana. (b) Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla sum usłonecznienia rzeczywistego w maju i we wrześniu w Łodzi w latach 1951–2000 71
Fig. 5.1.10. (a) The totals of actual sunshine duration in May and September as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź (bars). 5-year running average (solid line) and trend (dashes line). (b) The course of the sequence values of Mann–Kendall test for totals of actual sunshine duration in May and September. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$ 71
Ryc. 5.1.11. Roczny przebieg miesięcznych sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 74
Fig. 5.1.11. Annual course of the monthly totals of the actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 74
Ryc. 5.1.12. Roczny przebieg miesięcznych wartości usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1951–2000 74
Fig. 5.1.12. Annual course of the monthly values of the relative sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 74
Ryc. 5.1.13. Histogram sezonowych sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 77
Fig. 5.1.13. Histogram of the seasonal totals of actual sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 77
Ryc. 5.1.14. Histogram miesięcznych (I–VI) sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 78
Fig. 5.1.14. Histogram of the monthly totals of actual sunshine duration (I–VI) in Łódź in the period 1951–2000 78

Ryc. 5.1.15. Histogram miesięcznych (VII–XII) sum usłonecznienia rzeczywistego w Łodzi w latach 1951–2000 79
Fig. 5.1.15. Histogram of the monthly totals of actual sunshine duration (VII–XII) in Łódź in the period 1951–2000 79
Ryc. 5.1.16. Spektrum mocy usłonecznienia (I–VI) w Łodzi w latach 1951–2000. Linia pozioma ciągła – spektrum teoretyczne. Linia przerywana ciągła – poziom istotności 0,05 84
Fig. 5.1.16. Spectrum analysis of sunshine duration time series (I–VI) in Łódź in the period 1951–2000. Horizontal solid line – theoretical spectrum. Dashes line – the significant level 0.05 84
Ryc. 5.1.17. Spektrum mocy usłonecznienia (VII–XII) w Łodzi w latach 1951–2000. Linia pozioma ciągła – spektrum teoretyczne . Linia przerywana ciągła – poziom istotności 0,05 85
Fig. 5.1.17. Spectrum analysis of sunshine duration time series (VII–XII) in Łódź in the period 1951–2000. Horizontal solid line – theoretical spectrum. Dashes line – the significant level 0.05 85
Ryc. 5.1.18. Spektrum mocy rocznych sum usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000. Linia pozioma ciągła – spektrum teoretyczne. Linia przerywana ciągła – poziom istotności 0,05 86
Fig. 5.1.18. Spectrum analysis of the annual totals of sunshine duration time series in Łódź in the period 1951–2000. Horizontal solid line – theoretical spectrum. Dashes line – the significant level 0.05 86
Ryc. 5.1.19. Spektrum mocy dobowych wartości usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1951–2000. Linia przerywana – poziom istotności 0,05 86
Fig. 5.1.19. Spectrum analysis of the daily values of relative sunshine duration time series in Łódź in the period 1951–2000. Dashes line – the significant level 0.05 86
Ryc. 5.2.1. Sumy roczne usłonecznienia rzeczywistego w przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000 87
Fig. 5.2.1. The annual totals of actual sunshine duration in hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000 87
Ryc. 5.2.2. Sumy miesięczne usłonecznienia rzeczywistego w przedziałach godzinnych w Łodzi w latach 1951–2000 90
Fig. 5.2.2. The monthly totals of actual sunshine duration in hourly intervals in Łódź in the period 1951–2000 90
Ryc. 5.2.3. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1951–2000 91
Fig. 5.2.3. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1951–2000 91
Ryc. 5.2.4. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1951–1975 95
Fig. 5.2.4. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1951–1975 95
Ryc. 5.2.5. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1976–2000 95
Fig. 5.2.5. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1976–2000 95
Ryc. 5.2.6. Trendy liniowe godzinnych wartości usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000 (w godz./100 lat) 96
Fig. 5.2.6. The linear trend of hourly values of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 (in hour per 100 years) 96

Ryc. 5.2.7. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1951–1960 105
Fig. 5.2.7. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1951–1960 105
Ryc. 5.2.8. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1961–1970 105
Fig. 5.2.8. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1961–1970 105
Ryc. 5.2.9. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1971–1980 106
Fig. 5.2.9. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1971–1980 106
Ryc. 5.2.10. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1981–1990 106
Fig. 5.2.10. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1981–1990 106
Ryc. 5.2.11. Izoplety średnich godzinnych wartości usłonecznienia w biegu rocznym w Łodzi w latach 1991–2000 107
Fig. 5.2.11. Isopleths of the mean hourly values of sunshine duration in the annual course in Łódź in the period 1991–2000 107
Ryc. 5.3.1. Struktura usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000 108
Fig. 5.3.1. The structure of sunshine duration in Łódź in the period 1951–2000 . . 108
Ryc. 5.3.2. Przebieg roczny średniej liczby dni bezsłonecznych i bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 111
Fig. 5.3.2. Annual course of the mean number of sunless and very sunny days in Łódź in the period 1951–2000 111
Ryc. 5.3.3. Roczny przebieg liczby dni bezsłonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 111
Fig. 5.3.3. Annual course of the number of sunless days in Łódź in the period 1951–2000 111
Ryc. 5.3.4. Roczny przebieg liczby dni pochmurnych w Łodzi w latach 1951–2000 112
Fig. 5.3.4. Annual course of the number of cloudy days in Łódź in the period 1951–2000 112
Ryc. 5.3.5. Roczny przebieg liczby dni umiarkowanie słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 112
Fig. 5.3.5. Annual course of the number of moderately sunny days in Łódź in the period 1951–2000 112
Ryc. 5.3.6. Roczny przebieg liczby dni słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 . 113
Fig. 5.3.6. Annual course of the number of sunny days in Łódź in the period 1951–2000 113
Ryc. 5.3.7. Roczny przebieg liczby dni bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 113
Fig. 5.3.7. Annual course of the number of very sunny days in Łódź in the period 1951–2000 113
Ryc. 5.3.8. Roczna liczba dni w pięciu klasach usłonecznienia możliwego w odchyleniach od średniej wieloletniej w Łodzi w latach 1951–2000. Średnia ruchoma pentadowa – linia ciągła. Trend liniowy – linia przerywana . 116
Fig. 5.3.8. Annual totals of the number of days in five classes of possible sunshine duration as deviations from mean value for the period 1951–2000 in Łódź. 5-year running average – solid line. Linear trend – dashes line 116
Ryc. 5.3.9. Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznej liczby dni bezsłonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 120

Fig. 5.3.9. Course of the sequence values of Mann-Kendall test for annual totals of the number of sunless days. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$ 120
Ryc. 5.3.10. Przebieg sekwencyjnych wartości statystyki testu Mann-Kendalla dla rocznej liczby dni bardzo słonecznych w Łodzi w latach 1951–2000 120
Fig. 5.3.10. Course of the sequence values of Mann-Kendall test for annual totals of the number of very sunny days. Solid line – values of the progressive (forward) statistic $U(a)$. Dashes line – values of the regressive (backward) statistic $U(a)$ 120
Ryc. 5.3.11. Frekwencja co najmniej 5-dniowych ciągów dni bezsłonecznych w roku w Łodzi w latach 1951–2000 121
Fig. 5.3.11. Annual course of the frequency of sunless 5-day terms at the least in Łódź in the period 1951–2000 121
Ryc. 6.2.1. Przebieg roczny sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Linia ciągła – średnia ruchoma 31-dniowa 134
Fig. 6.2.1. Annual course of the daily sums of total solar radiation (D_t) and ultraviolet radiation (D_{uv}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. Solid line – 31-day running average 134
Ryc. 6.2.2. Przebieg roczny średnich sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) na tle sum dobowych na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Średnia ruchoma 31-dniowa 135
Fig. 6.2.2. The annual course of the mean daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) against a background of the values on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. The 31-day running average 135
Ryc. 6.2.3. Przebieg roczny najwyższych sum dobowych całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) na tle sum dobowych na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Średnia ruchoma 31-dniowa 136
Fig. 6.2.3. Annual course of the highest daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. The 31-day running average 136
Ryc. 6.2.4. Średnie i ekstremalne sumy dobowe promieniowania całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 . . . 137
Fig. 6.2.4. The mean and the extreme daily sums of total (D_t) and UV solar radiation (D_{uv}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 137
Ryc. 6.2.5. Przebieg roczny wszystkich sum dobowych promieniowania całkowitego i UV przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) i na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0} na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 138
Fig. 6.2.5. Annual course the all daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 138
Ryc. 6.2.6. Sumy dobowe promieniowania całkowitego i UV przy powierzchni ziemi (D_t, D_{uv}) i na górnej granicy atmosfery (D_{t0}, D_{uv0}) w funkcji wysokości Słońca nad horyzontem na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. 138

Fig. 6.2.6. The daily sums of total and UV solar radiation at the ground level (D_t, D_{uv}) and on the upper limit of the atmosphere (D_{t0}, D_{uv0}) as a function of the Sun height at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 . . . 138
Ryc. 6.2.7a. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego wiosną (III–V) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 142
Fig. 6.2.7a. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in spring (III–V) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 142
Ryc. 6.2.7b. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego latem (VI–VIII) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 143
Fig. 6.2.7b. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in summer (VI–VIII) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 . . 143
Ryc. 6.2.7c. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego jesienią (IX–XI) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 144
Fig. 6.2.7c. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in autumn (IX–XI) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 144
Ryc. 6.2.7d. Histogram sum dobowych całkowitego (D_t) i ultrafioletowego (D_{uv}) promieniowania słonecznego w zimie (XII–II) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 145
Fig. 6.2.7d. Histogram of daily sums of total (D_t) and UV (D_{uv}) solar radiation in winter (XII–II) at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 145
Ryc. 6.2.8. Przebieg roczny współczynnika transmisji sum dobowych całkowitego (T_t) i ultrafioletowego (T_{uv}) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. Linia ciągła – średnia ruchoma 31-dniowa 148
Fig. 6.2.8. Annual course of the transmission coefficient of the daily sums of total (T_t) and UV (T_{uv}) solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. Solid line – 31-day running average 148
Ryc. 6.2.9. Spektrum mocy dobowych sum całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi w latach 1997–2001. Linia przerywana – poziom istotności 0,05 149
Fig. 6.2.9. Spectrum analysis of the daily sums of total solar radiation time series in Łódź in the period 1997–2001. Dashes line – the significant level 0.05 149
Ryc. 6.2.10. Spektrum mocy dobowych sum ultrafioletowego promieniowania słonecznego w Łodzi w latach 1997–2001. Linia przerywana – poziom istotności 0,05 150
Fig. 6.2.10. Spectrum analysis of the daily sums of UV solar radiation time series in Łódź in the period 1997–2001. Dashes line – the significant level 0.05 . 150
Ryc. 6.3.1. Natężenie całkowitego i ultrafioletowego promieniowania słonecznego w wybranych dniach bezchmurnych na stacji Łódź-Lipowa 152
Fig. 6.3.1. Intensity of total and UV solar radiation in selected clear days at Łódź-Lipowa station 152
Ryc. 6.3.2. Najwyższe średnie 10-minutowe natężenie całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w przebiegu rocznym (na podstawie danych z lat 1997–2001) 152
Fig. 6.3.2. The highest 10-minute average intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation at Łódź-Lipowa station in annual course (based on data from the period 1997–2001) 152
Ryc. 6.3.3. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w dniu z absolutnie najwyższą 10-minutową średnią natężenia promieniowania całkowitego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001.

Cu con – chmura rodzaju *Cumulus congestus* obserwowana w czasie pomiarów 153
Fig. 6.3.3. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the day with occurrence of the absolute highest 10-minute average intensity of total solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. *Cu con – Cumulus congestus* cloud type was observed during measurements 153
Ryc. 6.3.4. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w dniu z absolutnie najwyższą 10-minutową średnią natężenia promieniowania UV na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001. *Cb cal* – chmura rodzaju *Cumulonimbus calvus* obserwowana w czasie pomiarów . 155
Fig. 6.3.4. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the day with occurrence the absolute highest 10-minute average intensity of UV solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001. *Cu cal – Cumulus calvus* cloud type was observed during measurements 155
Ryc. 6.3.5. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w dniu bezchmurnym (19 V 1999) i w dniu z zachmurzeniem konwekcyjnym (19 V 2001) na stacji Łódź-Lipowa 155
Fig. 6.3.5. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the clear day (19 May 1999) and in the day with convective clouds (19 May 2001) at Łódź-Lipowa station 155
Ryc. 6.3.6. Przebieg dobowy natężenia promieniowania całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) w wybranych dniach bezchmurnych i pochmurnych (zachmurzenie całkowite) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 160
Fig. 6.3.6. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in selected clear (A) and cloudy (overcast sky, B) days at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 160
Ryc. 6.3.7. Izoplety średnich godzinnych wartości natężenia całkowitego (I_t, Wm^{-2}) i ultrafioletowego (I_{uv}, Wm^{-2}) promieniowania słonecznego w biegu rocznym na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 162
Fig. 6.3.7. Isopleths of the mean hourly values of intensity of total (I_t, Wm^{-2}) and UV (I_{uv}, Wm^{-2}) solar radiation in annual course at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 162
Ryc. 6.3.8. Średni miesięczny przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego w okresie I–VI na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 163
Fig. 6.3.8. The monthly average daily course of intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the period I–VI at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 163
Ryc. 6.3.9. Średni miesięczny przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego w okresie VII–XII na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 163
Fig. 6.3.9. The monthly average daily course of intensity of total (I_t) and UV (I_{uv}) solar radiation in the period VII–XII at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 163
Ryc. 6.4.1. Zależność sum dobowych ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 168
Fig. 6.4.1. Relationship between the daily sums of UV and total solar radiation at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 168
Ryc. 6.4.2. Zależność sum dobowych ultrafioletu i całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych miesiącach na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 170

Fig. 6.4.2. Relationship between the daily sums of UV and total solar radiation in particular months at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 . . 170
Ryc. 6.4.3. Zależność udziału procentowego natężenia promieniowania UV w natężeniu promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) od wysokości Słońca (H_s) w warunkach bezchmurnego nieba na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 171
Fig. 6.4.3. Relationship between the ratio of UV to total intensity of solar radiation ($R_{uv/t}$, %) and the Sun height on cloudless weather conditions at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 171
Ryc. 6.4.4. Średni, najniższy i najwyższy udział procentowy sum dobowych promieniowania UV w sumach dobowych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) w biegu rocznym na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 171
Fig. 6.4.4. The mean, the lowest and the highest ratio of UV to total daily sums of solar radiation ($R_{uv/t}$, %) in annual course at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 171
Ryc. 6.4.5. Zależność udziału procentowego sum dobowych ultrafioletu w sumach dobowych promieniowania całkowitego ($R_{uv/t}$, %) od średniego dobowego zachmurzenia na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 174
Fig. 6.4.5. Relationship between the ratio of UV to total daily sums of solar radiation ($R_{uv/t}$, %) and the daily average cloudiness at Łódź-Lipowa station in the period 1997–2001 174
Ryc. 6.4.6. Udział procentowy ultrafioletu w natężeniu całkowitego promieniowania słonecznego ($R_{uv/t}$, %) jako funkcja natężenia całkowitego promieniowania słonecznego (I_t, Wm^{-2}) na stacji Łódź-Lipowa w latach 1997–2001 w warunkach: A – bezchmurnie, $H_s \geqslant 50°$, B – zachmurzenie całkowite, $H_s \geqslant 50°$. 176
Fig. 6.4.6. The ratio $R_{uv/t}$ (%) as a function of intensity of total solar radiation (I_t, Wm^{-2}) in various atmospheric condition: A – cloudless sky, sun elevation $\geqslant 50°$, B – overcast sky, sun elevation $\geqslant 50°$ 176
Ryc. 6.4.7. Przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego oraz udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym ($R_{uv/t}$) w dniu bezchmurnym (19 V 1999) i w dniu z zachmurzeniem konwekcyjnym (17 V 1999) 178
Fig. 6.4.7. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV solar radiation (I_{uv}) and the ratio UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) in the clear day (19 May 1999) and in the day with convective clouds (17 May 1999) 178
Ryc. 6.4.8. Przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego oraz udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym ($R_{uv/t}$) w dniu z zachmurzeniem niskim warstwowym i konwekcyjnym (19 V 2001) oraz w dniu z całkowitym zachmurzeniem przez chmury niskie warstwowe (22 VI 1999, dzień z najwyższym udziałem sumy dobowej ultrafioletu w sumie dobowej promieniowania całkowitego w latach 1997–2001) 179
Fig. 6.4.8. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV solar radiation (I_{uv}) and the ratio UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) in the day with low stratified and convective clouds (19 May 2001) and in the day with overcast sky (low stratified cloud types, 22 June 1999 – the highest ratio UV to total daily sums of solar radiation in the period 1997–2001) 179
Ryc. 6.4.9. Przebieg dobowy natężenia całkowitego (I_t) i ultrafioletowego (I_{uv}) promieniowania słonecznego oraz udziału procentowego ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym ($R_{uv/t}$) zimą w dniu bezchmurnym (17 XII 1997)

oraz w dniu z całkowitym zachmurzeniem przez chmury niskie warstwowe (11 I 1997) 180
Fig. 6.4.9. Daily course of the intensity of total (I_t) and UV solar radiation (I_{uv}) and the ratio UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) in winter: in the clear day (17 December 1997) and in the day with overcast sky (low stratified cloud types, 11 January 1997) 180
Ryc. 7.1.1. Średnie różnice sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego (w %, słupki) między centrum Łodzi a stacją zamiejską Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001. Średnia ruchoma 31-dniowa – linia ciągła . . 183
Fig. 7.1.1. The mean differences of the daily sums of total solar radiation (in %, bars) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in the years: 1998, 2000, 2001. The 31-day running average – solid line 183
Ryc. 7.1.2. Średnie różnice sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego (w MJm^{-2}) między centrum Łodzi a stacją Łódź-Lublinek w latach 1998, 2000, 2001. Średnia ruchoma 31-dniowa 184
Fig. 7.1.2. The mean differences of the daily sums of total solar radiation (in MJm^{-2}) between center of Łódź and rural station Łódź-Lublinek in the years: 1998, 2000, 2001. The 31-day running average – solid line . . 184
Ryc. 7.2.1. Fotografie przesłonięcia horyzontu na stacji Łódź-Lipowa i na stanowisku Lublinek wykonane obiektywem typu „rybie oko" (wyk. A. Podstawczyńska) 186
Fig. 7.2.1. The „fish eye" photographs of the horizon obstruction at Łódź-Lipowa and at measurement site Lublinek (photo by A. Podstawczyńska) 186
Ryc. 7.2.2. Zależność średnich dobowych różnic udziału procentowego promieniowania UV ($R_{uv/t}$) w promieniowaniu całkowitym od średnich dobowych różnic prężności pary wodnej (e) między stacjami Łódź-Lipowa i Łódź-Lublinek w okresie 11 VI–4 VII 2002 189
Fig. 7.2.2. Relationship between the mean daily differences of the ratio of UV to total solar radiation ($R_{uv/t}$) and the mean daily differences of water vapour pressure (e) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 11 June–4 July 2002 189
Ryc. 7.2.3. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 11–14 VI 2002 191
Fig. 7.2.3. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 11–14 June 2002 191
Ryc. 7.2.4. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 15–18 VI 2002 192
Fig. 7.2.4. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 15–18 June 2002 192
Ryc. 7.2.5. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{Huv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 19–22 VI 2002 193

Fig. 7.2.5. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 19–22 June 2002 193
Ryc. 7.2.6. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 23–26 VI 2002 194
Fig. 7.2.6. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 23–26 June 2002 194
Ryc. 7.2.7. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 27–30 VI 2002 195
Fig. 7.2.7. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 27–30 June 2002 195
Ryc. 7.2.8. Sumy godzinne promieniowania całkowitego, H_t, promieniowania ultrafioletowego, H_{uv}, udział procentowy ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym, $R_{H_uv/t}$, prężność pary wodnej e (hPa) na stacjach Lublinek i Lipowa w dniach 1–4 VII 2002 196
Fig. 7.2.8. The hourly sums of total solar radiation, H_t, UV radiation, H_{uv}, the ratio of UV to total solar radiation, $R_{H_uv/t}$, water vapour pressure e (hPa) at Łódź-Lipowa and Łódź-Lublinek stations in the period 1–4 July 2002 196
Ryc. 8.2.1. Współczynnik transmisji całkowitego promieniowania słonecznego jako funkcja usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1991–1998 202
Fig. 8.2.1. The transmission coefficient of total solar radiation as a function of relative solar radiation in Łódź in the period 1991–1998 202
Ryc. 8.2.2. Zależność korelacyjna teoretycznych (M_{t_teor}) i doświadczalnych (M_{t_rzecz}) sum miesięcznych promieniowania całkowitego w Łodzi w latach 1991–1998 204
Fig. 8.2.2. Correlation of the theoretical (M_{t_teor}) and the empirical (M_{t_rzecz}) monthly sums of total solar radiation in Łódź in the period 1991–1998 204
Ryc. 8.3.1. Współczynnik transmisji promieniowania ultrafioletowego jako funkcja usłonecznienia względnego w Łodzi w latach 1997–2000 206
Fig. 8.3.1. The transmission coefficient of UV solar radiation as a function of relative solar radiation in Łódź in the period 1997–2000 206
Ryc. 8.3.2. Zależność korelacyjna teoretycznych (M_{uv_teor}) i doświadczalnych (M_{uv_rzecz}) sum miesięcznych promieniowania ultrafioletowego w Łodzi w latach 1997–2000 209
Fig. 8.3.2. Correlation of the theoretical (M_{uv_teor}) and the empirical (M_{uv_rzecz}) monthly sums of UV solar radiation in Łódź in the period 1997–2000 209

THE SOLAR CHARACTERISTICS OF CLIMATE OF ŁÓDŹ

Summary

The objective of the study was the characterization of solar regime of Łódź and the surroundings e.g. the daily, the annual, the long-term variability of sunshine duration and total and UV solar radiation, the structure of sunshine duration with a special consideration of sunless and very sunny days, the relationship between solar components of climate, the influences of clouds on solar radiation income to an active surfaces, etc. The experimental materials for the study constituted of the daily totals of actual and relative sunshine duration in the period 1951–2000, the daily sums of total solar radiation in the period 1991–2002, measured in the Łódź-Lublinek station (S-W part of the city), 5-year data series of 10-minutes averages of intensity (in Wm^{-2}) of total (305–2800 nm) and UV (290–400 nm) solar radiation in the period 1997–2001, registered in the city center of Łódź.

The long-term tendencies of sunshine duration were analyzed by means of linear regression method and sequential version of the non-parametric Mann-Kendall test. All months excluding March, June and September are distinguished by a growing tendency of actual and relative sunshine duration. The number of sunny hours increases in spring, summer and winter, and decreases in autumn. An increase of annual sunshine duration totals (3.5h/year) within the 50-year period was stated.

Transformation of the annual course of sunshine duration within 50-year period was detected. The annual maximum of sunshine duration during the first 25-year period occurred in June and September. The second 25-year period was characterized by increase of the number of sunny hour in May and August and by decrease of sunshine duration in June and September. The time of registration of sunshine duration extended in the morning hours and before the Sun set as a consequences of low cloudiness negative trend.

The structure of sunshine duration in Łódź was presented in 5 classes of possible sunshine duration (0 – sunless days, 0.1–25% – cloudy days, 25.1–50% – moderately sunny days, 50.1–75% – sunny days, > 75% – very sunny days). Only very sunny days were distinguished by a positive annual totals trend, on average 4 days per 10 years.

The tendencies of sunshine duration recorded in Łódź within fifty last years are representative for Poland and result from the macroscale factor (atmospheric circulation) not only from the influences of local (anthropogenic) conditions.

The regular fluctuations in the time series of sunshine duration and solar radiation were investigated by Blackman-Tukey classical spectral analysis method.

The weak periodicity (statistical insignificance) amounted 8.3, 2.5, 2.8, 3.8 years and the significance short oscillations amounted 182.5, 91.2, 73 days were detected in sunshine duration time series. The total and UV solar radiation time series were characterized by 182.5, 121.7, 73 days significance periodicities.

The values of transmission coefficient of total and UV solar radiation were investigated. The daily values of transmission coefficient varied from 25% (total radiation) and 14% (UV) in December to 50% (total radiation) and 26% (UV) in May.