

JOANNA USCKA-KOWALKOWSKA

Zakład Klimatologii
Instytut Geografii – Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

EKSTYNKCJA BEZPOŚREDNIEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W PUŁAWACH W LATACH 1969–1989

Extinction of direct solar radiation in Puławy in the years 1969–1989

ABSTRAKT: W artykule przedstawiono problem ekstynkcji (osłabienia) bezpośredniego promieniowania słonecznego w Puławach. Ekstynkcja została wyrażona poprzez wskaźnik zmętnienia Linkego, który został obliczony na podstawie wyników pomiarów bezpośredniej irradacji słonecznej prowadzonych przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w latach 1969–1989. Wskaźnik zmętnienia obliczono i sprowadzono do masy optycznej atmosfery równej 2 wg metodyki zaproponowanej przez Greniera i in. (6). Średnia wartość wskaźnika zmętnienia atmosfery w badanym okresie mieści się w klasie o podwyższonym stopniu zmętnienia i wynosi 3,41. W ciągu całego okresu badawczego zanotowano jednak poprawę warunków optycznych atmosfery wyrażającą się spadkiem wielkości wskaźnika zmętnienia Linkego. Przebieg roczny zmętnienia atmosfery jest typowy, tzn. jego wzrost obserwowany jest w ciepłym półroczu, a spadek w chłodnym. W przebiegu dziennym średnio zmętnienie atmosfery wzrasta wraz ze wzrostem wysokości Słońca nad horyzontem. Zmętnienie atmosfery zależy także od rodzaju występujących mas powietrza. W badanym okresie w Puławach najmniejsze zmętnienie atmosfery wystąpiło w powietrzu arktycznym (2,79), natomiast największe w powietrzu zwrotnikowym (4,05). Masy powietrza polarno-kontynentalnego i polarno-morskiego charakteryzują się zbliżonym stopniem zmętnienia atmosfery, wynoszącym odpowiednio 3,44 i 3,50.

słowa kluczowe – key words:

bezpośrednie promieniowanie słoneczne – *direct solar radiation*, wskaźnik zmętnienia Linkego – *Linke's turbidity factor*, Puławy – *Puławy*

WSTĘP

Promieniowanie słoneczne po przejściu przez atmosferę ziemską jest osłabione w stosunku do tego, które dochodzi do jej górnej granicy. Osłabienie to, zwane ekstynkcją, jest zależne od ilości i rodzaju cząstek napotykanymi przez nie w drodze przez atmosferę. Ekstynkcja promieniowania zachodzi na skutek procesów rozpraszania i absorpcji, które są powodowane przez naturalne i antropogeniczne składniki atmosfery. Bardziej zanieczyszczona atmosfera powoduje większą ekstynkcję pro-

mieniowania, zmniejszając tym samym jego dopływ do powierzchni Ziemi. Zwiększone zanieczyszczenie powietrza towarzyszy zwykle ośrodkom miejskim i przemysłowym, dlatego też badania ekstynkcji atmosferycznej są tam szczególnie ważne. Pozwalają one na poznanie ważnego składnika bilansu promieniowania słonecznego, jakim jest promieniowanie bezpośrednie i pośrednio informują o zanieczyszczeniu powietrza, które wywiera istotny wpływ na warunki życia człowieka. Na ekstynkcję promieniowania słonecznego w Puławach mają wpływ zarówno czynniki antropogeniczne, związane z funkcjonowaniem ośrodka miejskiego i z działalnością zakładów przemysłowych na terenie miasta, jak i czynniki naturalne. W przedstawianym w pracy okresie zaobserwowano zmniejszenie się ekstynkcji promieniowania, co świadczy o poprawie warunków optycznych atmosfery na obszarze Puław.

MATERIAŁ I METODY

Problem ekstynkcji bezpośredniego promieniowania słonecznego w Puławach został opracowany na podstawie wyników pomiarów bezpośredniej irradacji słonecznej, prowadzonych przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w latach 1969–1989.

Pomiary były wykonywane w punkcie o współrzędnych $51^{\circ}25'\varphi$ N i $21^{\circ}58'\lambda$ E na wysokości 147 m n.p.m. przy użyciu aktynometru Linke-Feussnera w zależności od pory roku co 5 lub co 10° wysokości Słońca nad horyzontem i w czasie górowania Słońca w danym dniu. Do opracowania wykorzystano wyniki pomiarów dla wysokości Słońca nad horyzontem większej lub równej 10° , prowadzonych tylko wtedy, kiedy tarcza słoneczna nie była przesłonięta przez chmury, stąd też ich liczba w poszczególnych latach badanego okresu jest zmienna. Łącznie na materiał pomiarowy złożyło się 665 dni, na które przypadają 3144 serie pomiarowe. Największa liczba dni (285) i serii pomiarowych (1670) przypada na lato, natomiast najmniejszą liczbą dni (76) i serii pomiarowych (216) charakteryzuje się zima, kiedy dzień jest najkrótszy i występuje największe zachmurzenie w przebiegu rocznym. Bogatszy materiał aktynometryczny przypada na wiosnę w porównaniu z jesienią. Ze względu na wpływ zachmurzenia na liczbę pomiarów, w zgromadzonym materiale aktynometrycznym udział serii pomiarowych przedpołudniowych nie jest taki sam jak udział serii popołudniowych. Prawie 62% wszystkich serii przypada na okres przedpołudniowy, w związku z czym na popołudnie pozostaje ponad 38% serii. Spośród wszystkich 665 dni, w których prowadzono badania, tylko część posiada pomiary wykonywane przed i po południu, natomiast w pozostałych dniach pomiary były wykonywane tylko przed (w większości przypadków) lub tylko po południu. Dni, w których pomiary były wykonywane w obu częściach dnia, w całym materiale pomiarowym jest łącznie 252. Wszędzie tam, gdzie chciano przedstawić przebieg dzienny ekstynkcji atmosferycznej, wykorzystywano jedynie takie dni, w których pomiary były prowadzone przed i po południu.

Wielkość ekstynkcji została przedstawiona za pomocą wskaźnika zmętnienia Linkego, który wyraża stosunek ekstynkcji promieniowania słonecznego w atmosferze rzeczywistej do ekstynkcji w atmosferze czystej i suchej. Wskaźnik ten został obliczony ze wzoru:

$$T_L = (1/\delta_R m_A) \ln(E_{O_{SC}}/I_N),$$

gdzie: δ_R – zintegrowana grubość optyczna czystej i suchej atmosfery, zwana także współczynnikiem osłabienia,

m_A – masa optyczna atmosfery,

$E_{O_{SC}}$ – stała słoneczna obliczona dla danego dnia ($I_{SC}=1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),

I_N – bezpośrednia irradiaacja słoneczna ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) zmierzona przy powierzchni Ziemi.

Zintegrowana grubość optyczna czystej i suchej atmosfery została obliczona ze wzoru (6):

$$\delta_R = (5,4729 + 3,0312m_A - 0,6329m_A^2 + 0,0910m_A^3 - 0,00512m_A^4)^{-1}.$$

Masa optyczna atmosfery, zgodnie z zaleceniem WMO (WMO/149) została obliczona ze wzoru, który w 1966 roku wprowadził F. Kasten:

$$m'_A = [\sin h + 0,15(h+3,885)^{-1,253}]^{-1},$$

gdzie: h – wysokość Słońca nad horyzontem ($^\circ$).

Do masy optycznej została wprowadzona poprawka na ciśnienie atmosferyczne:

$$m_A = m'_A \cdot P/1013,25,$$

gdzie: P – ciśnienie atmosferyczne mierzone na wysokości punktu pomiarowego (hPa).

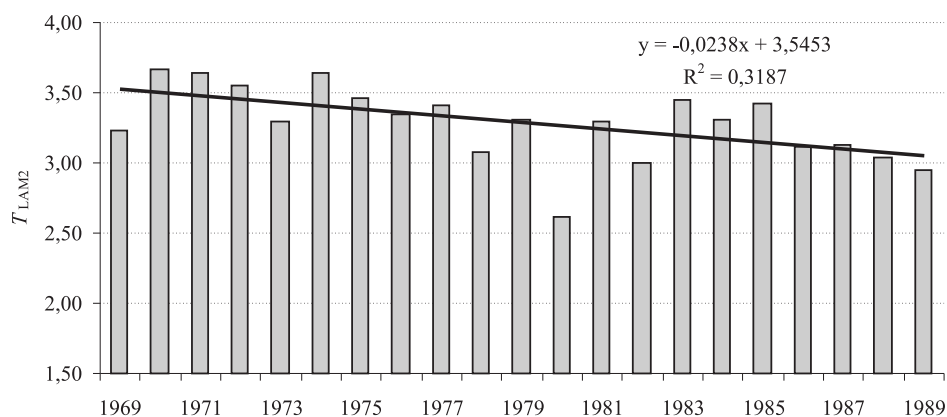
Ponieważ wskaźnik zmętnienia zależy od masy optycznej atmosfery, aby wyeliminować tę niedogodność zwykle sprowadza się go do masy optycznej równej 2, która odpowiada wysokości Słońca równej 30° . W tym celu posłużono się metodą zaproponowaną przez Greniera i in. (6). Wskaźnik T_L zastąpiono wskaźnikiem T_{LAM2} , czyli wskaźnikiem przy masie optycznej równej 2. W zależności od zawartości wody opadowej w atmosferze użyto do obliczeń jednego z dwóch algorytmów. Zawartość wody opadowej w atmosferze została policzona na podstawie ciśnienia pary wodnej zmierzonego przy powierzchni Ziemi, wg następującego wzoru (2):

$$w = 0,16 \cdot e \text{ (hPa)},$$

gdzie: e – ciśnienie pary wodnej przy powierzchni Ziemi (hPa).

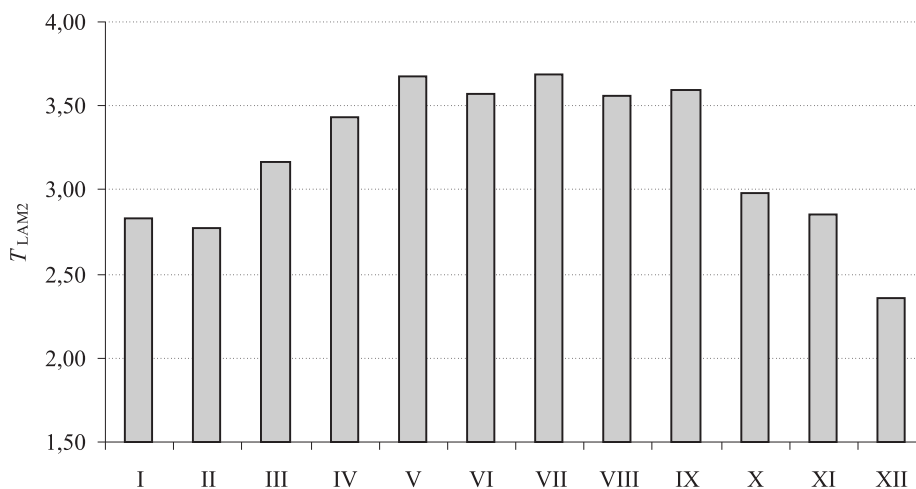
WYNIKI

W Puławach w okresie 1969–1989 średnia wielkość wskaźnika zmętnienia Linkego wyniosła 3,41, natomiast w poszczególnych latach badanego okresu wahała się ona od 2,62 w 1980 roku do 3,67 w 1970 roku (rys. 1). W drugiej połowie lat 80. wyraźnie zaznaczyła się tendencja do zmniejszania się wielkości zmętnienia atmosfery. Zmniejszanie się zmętnienia atmosfery w całym badanym okresie uwidacznia się zarówno w półroczu ciepłym, jak i w chłodnym.



Rys. 1. Przebieg średnich rocznych wartości wskaźnika zmętnienia Linkego w Puławach w latach 1969–1989

Course of mean annual values of the Linke's turbidity factor in Puławy in the years 1969–1989



Rys. 2. Średni roczny przebieg wskaźnika zmętnienia Linkego w Puławach w okresie 1969–1989
Mean annual course of the Linke's turbidity factor in Puławy in the years 1969–1989

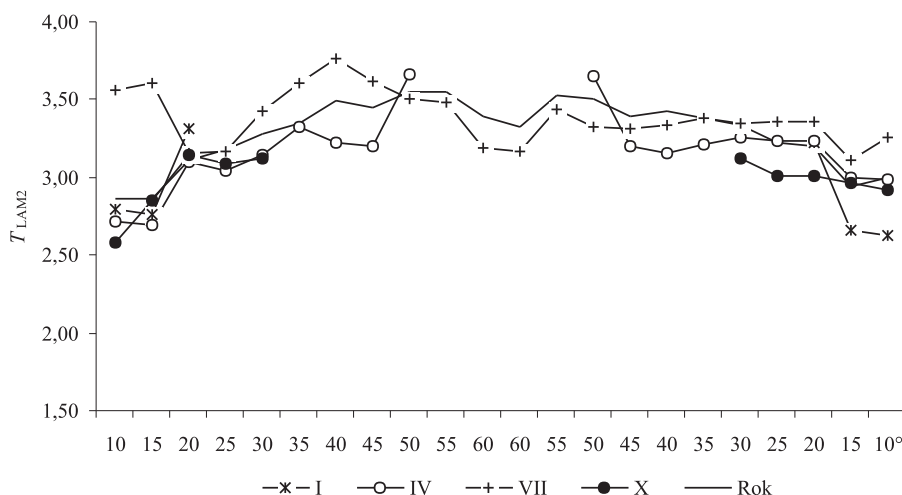
W przebiegu rocznym najmniejsze zmętnienie atmosfery występuje w półroczu chłodnym, natomiast największe w półroczu ciepłym, kiedy to w powietrzu jest najwięcej pary wodnej i aerozolu (rys. 2). W badanym okresie w Puławach najmniejsze zmętnienie atmosfery przypadło na grudzień ($T_{LAM2}=2,36$), natomiast największe na

maj ($T_{L_{AM2}} = 3,68$) i na lipiec ($T_{L_{AM2}} = 3,69$). Spośród pór roku średnio najmniejszym zmętnieniem atmosfery charakteryzuje się zima ($T_{L_{AM2}} = 2,70$), a największym lato ($T_{L_{AM2}} = 3,60$). Większe zmętnienie występuje wiosną ($T_{L_{AM2}} = 3,47$) niż jesienią ($T_{L_{AM2}} = 3,31$).

Podobny przebieg roczny stopnia zmętnienia atmosfery z minimum w okresie chłodnym i maksimum w okresie ciepłym zaobserwowano także w innych miejscach, np. w Montfavet we Francji (12), w Dhahran (Arabia Saudyjska) (1), w Atenach (8, 9, 11), w Grenoble i okolicy (7) oraz w Athalassa na Cyprze (10). W Polsce taki przebieg roczny zmętnienia atmosfery stwierdzono także np. w Warszawie, w Belsku i na Kasprowym Wierchu (14) oraz w Papowie Toruńskim reprezentującym strefę podmiejską Torunia (17).

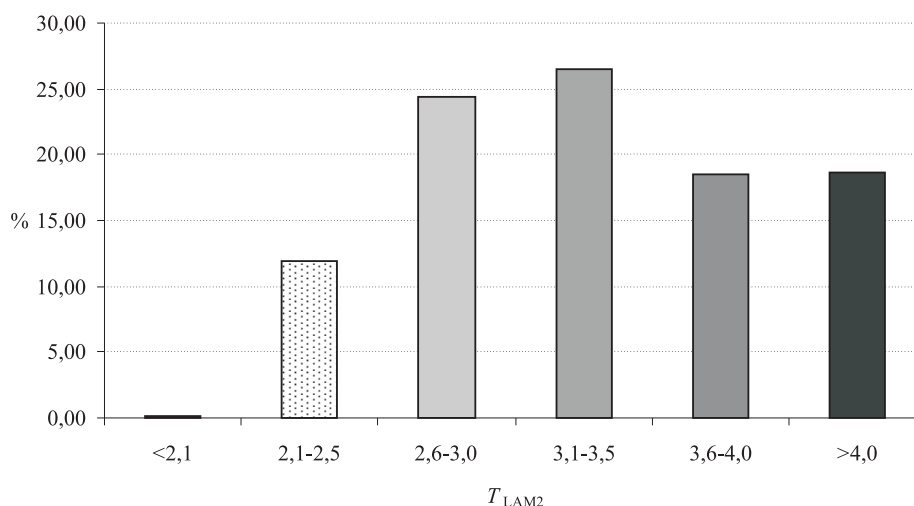
W średnim przebiegu dziennym zmętnienia atmosfery widać jego wzrost wraz ze wzrostem wysokości Słońca nad horyzontem. Jedynie dla największych wysokości Słońca (60°) zmętnienie atmosfery nieco spada (rys. 3). W poszczególnych miesiącach roku przebieg dzienny jest bardziej zróżnicowany, ale także uwidacznia się tendencja do wzrostu zmętnienia atmosfery wraz ze wzrostem wysokości Słońca nad horyzontem.

Wskaźnik zmętnienia Linkego w badanym okresie zmieniał się w dość szerokich granicach, wynosząc od 1,94 w dniu 15.11.1973 roku do 7,19 w dniu 6.09.1972 roku. Oznacza to, że atmosfera w Puławach powodowała od prawie dwukrotnie do ponad siedmiokrotnie większe osłabienie promieniowania słonecznego niż atmosfera czysta i sucha.



Rys. 3. Średni przebieg dzienny wskaźnika zmętnienia Linkego w wybranych miesiącach i w roku w Puławach w okresie 1969–1989

Mean diurnal course of the Linke's turbidity factor in selected months and in the year in Puławy in the years 1969–1989



Rys. 4. Względna częstość (%) występowania dni o średnich wartościach wskaźnika zmętnienia Linkego (T_{LAM2}) wg klas w Puławach w okresie 1969–1989
Relative frequency (%) of occurrence of days with mean value of the Linke's turbidity factor (T_{LAM2}) according to classes in Puławy in the years 1969–1989

Wszystkie dni, w których wykonywano badania zmętnienia atmosfery, zostały podzielone na klasy według średnich wartości T_{LAM2} (rys. 4) w oparciu o klasy zmętnienia zaproponowane przez Siwkowa (16). W badanym okresie w Puławach dominują dni zaliczone do klasy o podwyższonym (3,1–3,5) i normalnym (2,6–3,0) stopniu zmętnienia, stanowiące łącznie 50,8% wszystkich dni, w których wykonywano obserwacje. Dni o silnie podwyższonym (3,6–4,0) i wysokim (>4,0) stopniu zmętnienia atmosfery charakteryzują się zbliżoną i dość dużą częstością wynoszącą odpowiednio 18,5% i 18,6%. Najmniej jest dni o bardzo małym stopniu zmętnienia (<2,1), które stanowią zaledwie 0,2%.

Udział dni należących do poszczególnych klas zmienia się w zależności od pory roku (tab. 1). Wiosną i latem dominuje klasa o podwyższonym stopniu zmętnienia atmosfery, na którą przypada odpowiednio 26,5% i 31,2% dni. Jesienią maksimum częstości przesuwa się na klasę o normalnym stopniu zmętnienia (30,9%), a zimą aż 50,0% dni charakteryzuje się małym stopniem zmętnienia atmosfery. W ciągu całego okresu badawczego wystąpił zaledwie jeden dzień, w którym średnia wartość wskaźnika zmętnienia Linkego była mniejsza od 2,1, co pozwoliło go zaliczyć do klasy dni o bardzo małym stopniu zmętnienia atmosfery. Dni o średnim zmętnieniu >4,0 odnotowane były we wszystkich porach roku, a maksimum częstości przypadło na lato.

Ekstynkcja promieniowania słonecznego zależy także od występujących mas powietrza. Rodzaje mas powietrza zalegających nad Puławami w dniach, w których

Tabela 1

Bezwzględna (n) i względna (%) częstość występowania dni o średnich wartościach wskaźnika zmętnienia Linkego ($T_{L_{AM2}}$) wg klas w poszczególnych porach roku w Puławach w okresie 1969–1989
 Absolute (n) and relative (%) frequency of occurrence of days with mean value of the Linke's turbidity factor ($T_{L_{AM2}}$) according to classes in different seasons in Puławy in the years 1969–1989

$T_{L_{AM2}}$	XII–II		III–V		VI–VII		IX–XI	
	n	%	n	%	n	%	n	%
<2,1	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,8
2,1–2,5	38	50,0	20	11,0	4	1,4	17	13,8
2,6–3,0	24	31,6	36	19,9	64	22,5	38	30,9
3,1–3,5	6	7,9	48	26,5	89	31,2	33	26,8
3,6–4,0	7	9,2	42	23,2	60	21,1	14	11,4
>4,0	1	1,3	35	19,3	68	23,9	20	16,3

proawdzono badania, zostały określone na podstawie Biuletynów Synoptycznych i Meteorologicznych (3) oraz Codziennych Biuletynów Meteorologicznych (4) opublikowanych przez IMGW (dawniej PIHM). W Puławach w badanym okresie w dniach, kiedy wykonywano pomiary aktywności, z największą częstością występowało powietrze polarno-morskie (polarno-morskie, polarno-morskie ciepłe, polarno-morskie stare i polarno-morskie ciepłe i stare), na które przypadało aż 45,3% dni. Powietrze polarno-kontynentalne występowało z niewiele mniejszą częstością (37,9%), natomiast na trzecim miejscu pod względem częstości występowania znalazło się powietrze arktyczne (12,5%). Wśród mas powietrza arktycznego wyróżniono powietrze arktyczne, powietrze arktyczne stare i powietrze arktyczno-morskie. Najrzadziej nad Puławami zalegały masy powietrza zwrotnikowego (4,4%), wśród których wyróżniono powietrze zwrotnikowe, zwrotnikowo-morskie, zwrotnikowo-kontynentalne, zwrotnikowo-morskie stare i zwrotnikowe stare.

W Puławach średnio najmniejszym stopniem zmętnienia charakteryzowało się powietrze arktyczne (2,79), natomiast największym powietrze zwrotnikowe (4,05). Masy powietrza polarno-kontynentalnego i polarno-morskiego charakteryzowały się zbliżonym stopniem zmętnienia atmosfery, wynoszącym odpowiednio 3,44 i 3,50. Uzyskane wyniki można porównać z wynikami badań prowadzonych w innych miejscach. W latach 1957–1960 badania zmętnienia atmosfery w różnych masach powietrza prowadzone były w Warszawie i w Belsku (5). W obu punktach najmniejsze zmętnienie występowało, podobnie jak w Puławach, w masach arktycznych. Największe zmętnienie atmosfery w Warszawie występowało w powietrzu zwrotnikowym, natomiast w Belsku w powietrzu polarno-kontynentalnym ciepłym. Masy powietrza polarno-kontynentalnego przewyższały pod względem zmętnienia masy polarno-morskie. Według późniejszych badań prowadzonych w latach 1961–1963 w Warszawie przez Krawczyk (13) najmniejszym stopniem zmętnienia charakteryzowało się powietrze arktyczne stare, a następnie powietrze polar-

no-kontynentalne, natomiast największe zmętnienie występowało w masach powietrza polarno-morskiego starego i zwrotnikowego. W Poczdamie (15) najmniejsze zmętnienie występowało w powietrzu arktycznym, natomiast największe w powietrzu zwrotnikowym. Powietrze polarno-kontynentalne charakteryzowało się nieco większym zmętnieniem niż masy polarno-morskie. W latach 1999–2001 w strefie podmiejskiej Torunia (Papowo Toruńskie), podobnie jak w Puławach, najmniejsze zmętnienie atmosfery występowało w masach powietrza arktycznego ($T_{L_{AM2}} = 2,34$), natomiast największe w powietrzu zwrotnikowym ($T_{L_{AM2}} = 3,68$). Masy powietrza polarno-morskiego charakteryzowały się nieco mniejszym stopniem zmętnienia ($T_{L_{AM2}} = 2,71$) niż masy polarno-kontynentalne ($T_{L_{AM2}} = 2,82$). W przypadku Papowa Toruńskiego uzyskane wyniki można bezpośrednio porównać z wynikami z Puław, gdyż obliczenia zostały wykonane tą samą metodą (17).

W zależności od masy powietrza zmienia się udział dni należących do różnych klas zmętnienia atmosfery. W masach powietrza arktycznego (tab. 2) największą częstością charakteryzują się dni przypadające na klasę o normalnym stopniu zmętnienia, które stanowią aż 42,2% wszystkich dni z tą masą powietrza w całym prezentowanym okresie badawczym. W pozostałych masach powietrza maksimum częstości przesuwa się na klasy o większym stopniu zmętnienia atmosfery. W masach powietrza polarnego najczęściej występowały dni o podwyższonym stopniu zmętnienia stanowiące 26,2% w powietrzu polarno-kontynentalnym i 29,9% w powietrzu polarno-morskim. W powietrzu zwrotnikowym aż 44,8% wszystkich dni charakteryzowało się wysokim stopniem zmętnienia.

Tabela 2

Bezwzględna (n) i względna (%) częstość występowania dni o średnich wartościach wskaźnika zmętnienia Linkego ($T_{L_{AM2}}$) wg klas w poszczególnych masach powietrza w Puławach w okresie 1969–1989

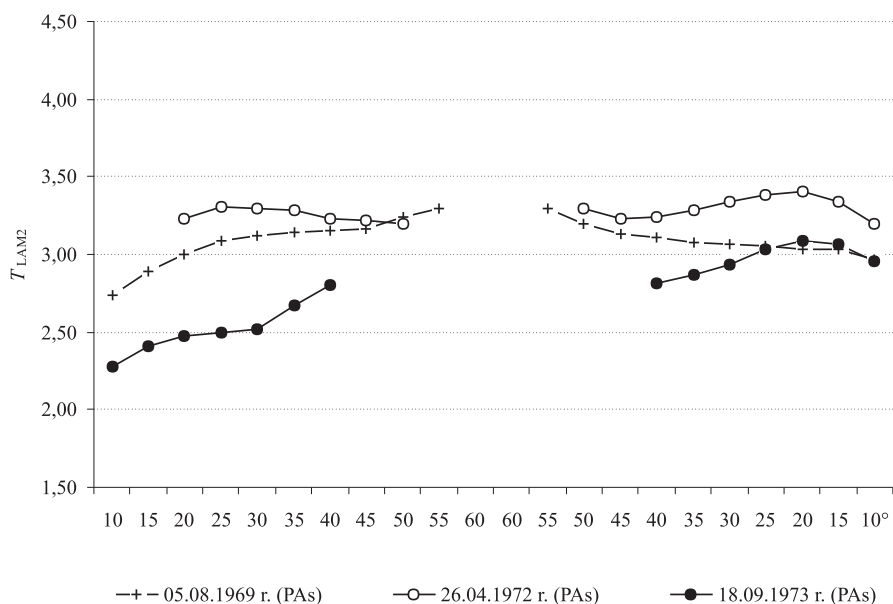
Absolute (n) and relative (%) frequency of occurrence of days with mean value of the Linke's turbidity factor ($T_{L_{AM2}}$) according to classes in different air masses in Puławy in the years 1969–1989

$T_{L_{AM2}}$	Masy powietrza; Air masses							
	arktyczne arctic (1)		polarno- -kontynentalne polar-continental (2)		polarno-morskie polar-maritime (3)		zwrotnikowe tropical (4)	
	n	%	n	%	n	%	n	%
<2,1	1	1,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
2,1–2,5	27	32,5	36	14,3	16	5,3	0	0,0
2,6–3,0	35	42,2	48	19,0	75	24,9	4	13,8
3,1–3,5	15	18,1	66	26,2	90	29,9	5	17,2
3,6–4,0	4	4,8	53	21,0	59	19,6	7	24,1
>4,0	1	1,2	49	19,4	61	20,3	13	44,8

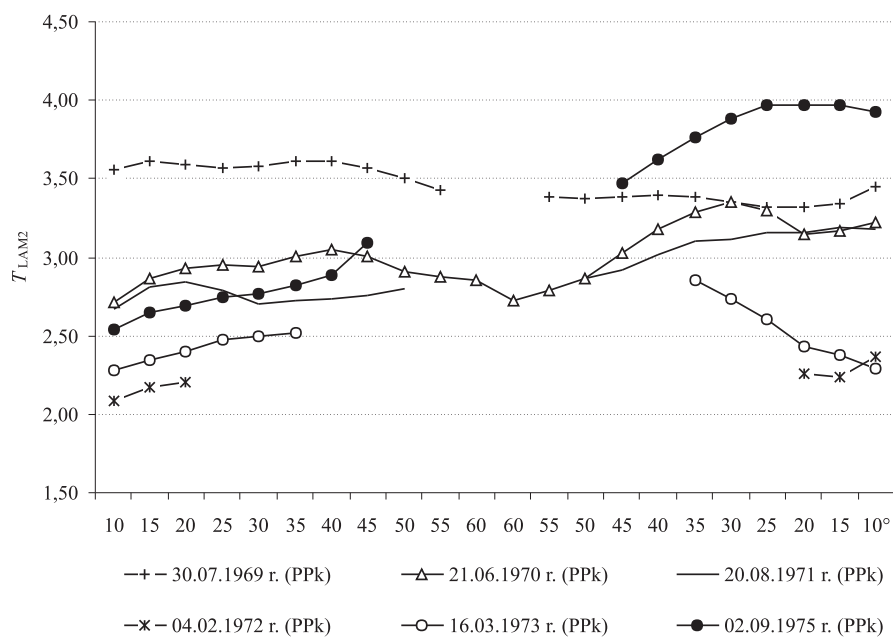
(1) – PA, PAm, PAs, (2) – PPk, (3) – PPm, PPmc, PPmcs, PPms, (4) – PZ, PZk, PZm, PZms, PZs

Klasa o bardzo małym zmętnieniu reprezentowana była tylko w powietrzu arktycznym, natomiast dni o wysokim zmętnieniu atmosfery wystąpiły przy wszystkich masach powietrza, z największą częstością w powietrzu zwrotnikowym, a z najmniejszą w powietrzu arktycznym (tab. 2).

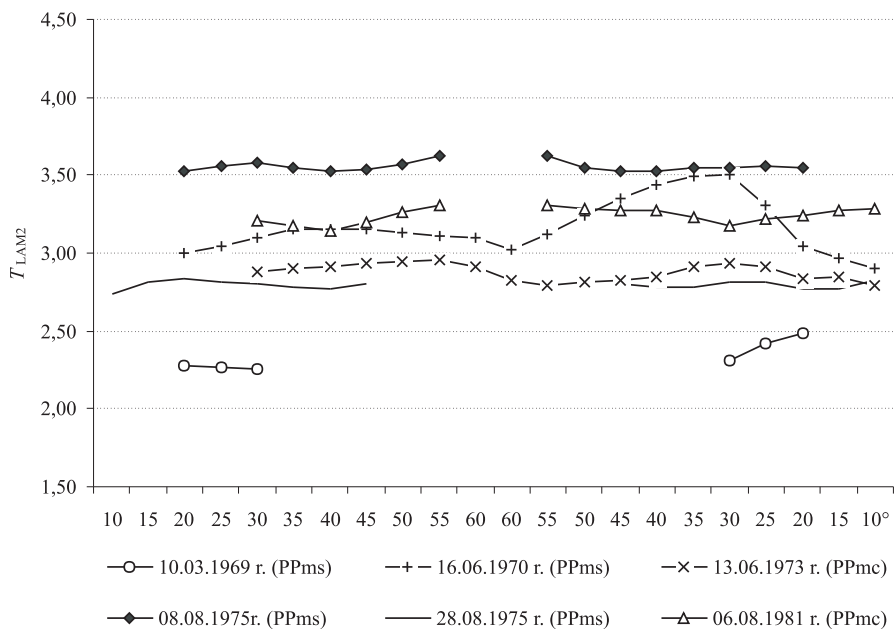
W poszczególnych dniach średnia wielkość wskaźnika zmętnienia atmosfery, a także dzienny przebieg jego zmian może się kształtować bardzo różnie w zależności od przebiegu dziennego zawartości pary wodnej i aerozolu w atmosferze. Na rysunkach 5-8 zaprezentowano przebiegi dzienne zmętnienia atmosfery w wybranych dniach dla różnych mas powietrza. Zmętnienie atmosfery może utrzymywać się przez cały dzień na zbliżonym poziomie, tak jak np. w dniu 08.08.1975 r. w masie powietrza polarno-morskiego starego. Najczęściej jednak zmętnienie atmosfery zmienia się w ciągu dnia wzrastając (np. w dniu 16.03.1973 r. w masie powietrza polarno-kontynentalnego lub w dniu 05.08.1969 r. w masie powietrza arktycznego starego) lub malejąc (np. w dniu 10.03.1969 r. w masie powietrza polarno-morskiego starego) wraz ze wzrostem wysokości Słońca nad horyzontem. Zmętnienie atmosfery może zmieniać się także w jednym kierunku w ciągu dnia jak widać to np.



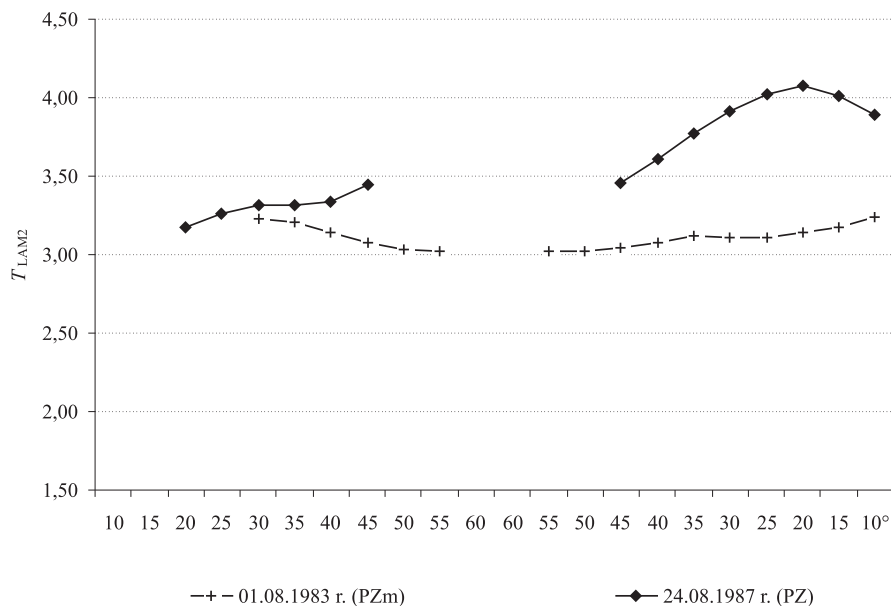
Rys. 5. Przebieg dzienny zmętnienia atmosfery (T_{LAM2}) w masach powietrza arktycznego w wybranych dniach w Puławach w okresie 1969–1989
Diurnal course of the atmospheric turbidity (T_{LAM2}) in arctic air masses in selected days in Puławy in 1969–1989



Rys. 6. Przebieg dzienny zmiętnienia atmosfery ($T_{L_{AM2}}$) w masach powietrza polarno-kontynentalnego w wybranych dniach w Puławach w okresie 1969–1989
 Diurnal course of the atmospheric turbidity ($T_{L_{AM2}}$) in polar-continental air masses in selected days in Puławy in 1969–1989



Rys. 7. Przebieg dzienny zmiętnienia atmosfery ($T_{L_{AM2}}$) w masach powietrza polarno-morskiego w wybranych dniach w Puławach w okresie 1969–1989
 Diurnal course of the atmospheric turbidity ($T_{L_{AM2}}$) in polar-maritime air masses in selected days in Puławy in 1969–1989



Rys. 8. Przebieg dzienny zmętnienia atmosfery (T_{LAM2}) w masach powietrza zwrotnikowego w wybranych dniach w Puławach w okresie 1969–1989
Diurnal course of the atmospheric turbidity (T_{LAM2}) in tropical air masses in selected days in Puławy in 1969–1989

w dniu 02.09.1975 r. w masie powietrza polarno-kontynentalnego, kiedy zmętnienie wzrasta od wschodu do zachodu Słońca. Przebiegi zmętnienia atmosfery mogą być też bardziej urozmaicone, jak np. w dniu 16.06.1970 r. w masie powietrza polarno-morskiego starego.

WNIOSKI

W Puławach w latach 1969–1989 średnia ekstynkcja wyrażona przez wskaźnik zmętnienia Linkego wyniosła 3,41, co oznacza że w badanym okresie występowało podwyższone zmętnienie atmosfery. Dość duże zmętnienie może być w pewnym stopniu związane z zanieczyszczeniem atmosfery powodowanym przez samo miasto, jak również prawdopodobnie z działalnością zakładów azotowych usytuowanych w jego północnej części. Oprócz czynników antropogenicznych na osłabienie bezpośredniego promieniowania słonecznego w Puławach mogą mieć wpływ także czynniki naturalne, np. zapylenie powietrza związane z wywiewaniem drobnej frakcji z lessowego podłoża.

W badanym okresie zarysowuje się tendencja do spadku stopnia zmętnienia, co oznacza poprawę stanu optycznego atmosfery. Prawdopodobnie jest to związane ze

spadkiem emisji zanieczyszczeń przemysłowych do atmosfery, czyli z ograniczeniem działania czynnika antropogenicznego.

W przebiegu rocznym zmętnienia atmosfery obserwuje się jego wzrost w ciepłym półroczu i spadek w chłodnym, co jest zjawiskiem typowym także dla wielu innych miejsc, gdzie prowadzono tego typu badania. Taki przebieg roczny zmętnienia atmosfery jest przebiegiem naturalnym, tzn. wywołanym przez zmiany zawartości pary wodnej i naturalnych aerozoli w atmosferze. W przebiegu dziennym natomiast zmętnienie wzrasta wraz ze wzrostem wysokości Słońca nad horyzontem.

Na ekstynkcję promieniowania słonecznego w Puławach miały wpływ także występujące masy powietrza. Masy powietrza arktycznego, czyste i zawierające mało pary wodnej, w najmniejszym stopniu ograniczały dopływ promieniowania bezpośredniego do powierzchni Ziemi, natomiast masy zwrotnikowe, o dużym zapyleniu i średnio największej zawartości pary wodnej, powodowały największą ekstynkcję. W powietrzu polarno-morskim ekstynkcja promieniowania okazała się nieco większa niż w powietrzu polarno-kontynentalnym, co zostało spowodowane znacznie większą zawartością pary wodnej i nieco większym zmętnieniem aerozolowym w masie polarno-morskiej.

LITERATURA

1. Abdelrahman M.A., Said S.A.M., Shuaib A.N.: Comparison between atmospheric turbidity coefficients of desert and temperate climate. *Solar Energy*, 1988, **40**: 219-225.
2. Awierkijew M.S., Jewniewicz T.W.: Opriedielenije aerozolnoj i wlaźnoj mutnosti riealnoj atmosfery. *Mietieorologija i Gidrologija*, 1973, 53-58.
3. Biuletyn Synoptyczny, 1969-1972, Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny, Biuletyn Meteorologiczny 1973-1978, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
4. Codzienny Biuletyn Meteorologiczny, 1979-1989, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
5. Dziewulska-Łosiowa A.: Próba oceny zakłócenia przezroczystości atmosfery w Warszawie. *Prz. Geofiz.*, 1962, **VII(2)**: 111-116.
6. Grenier J.C., de La Casinière A., Cabot T.: A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications. *Solar Energy*, 1994, **52**: 303-313.
7. Grenier J.C, de La Casinière A., Cabot T.: Atmospheric Turbidity analyzed by means standardized Linke's Turbidity factor. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1449-1458.
8. Jacovides C.P., Kaltsounides N.A., Ginnourakos G.P., Kallos G.B.: Trends in attenuation coefficients in Athens, Greece, from 1954 to 1991. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1459-1465.
9. Jacovides C.P., Karalis J.D.: Broad band turbidity parameters and spectral band resolution of solar radiation for the period 1954-1991 in Athens. Greece. *Int. J. Climatol.*, 1996, **16**: 229-242.
10. Jacovides C.P., Timbrios F.S., Giannourakos G.P., Pashiardis S., Stefanou L.: Recent measurements of broad-band turbidity parameters in the island of Cyprus. *Atmos. Environ*, 1996, **30**: 3391-3396.
11. Kambezidis H.D., Founda D.H., Papanikolaou N.S.: Linke and Unsworth-Monteith turbidity parameters in Athens. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1993, **119**: 367-374.
12. Katz M., Beille A., Mermier M.: Atmospheric turbidity in semi rural site – I: evaluation and comparison of different atmospheric turbidity coefficients. *Solar Energy*, 1982, **28**: 323-327.
13. Krawczyk B.: Badania zmętnienia atmosfery w Warszawie w latach 1961–1963. *Prz. Geofiz.*, 1968, **XI(4)**: 823-832.

14. Michałowska-Smak A.: Seasonal and secular changes of atmospheric turbidity in Warsaw and Belsk in the interval 1957 – 1980. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., 1981, D-13, **149**: 115-131.
15. Robinson N.: Solar radiation. Amsterdam, London, New York, Elsevier Publishing Company, 1966.
16. Siwkow S.I.: Metody rasczeta charakteristik solniecznoj radiacyi. Leningrad, Gidromieteoizdat, 1968.
17. Uscka J.: Direct solar radiation and its attenuation by the atmosphere with different air masses in the suburban area of Toruń. Wrocław, Studia Geograficzne 75, Acta Universitatis Wratislaviensis 2003, **2542**: 268-281.

EXTINCTION OF DIRECT SOLAR RADIATION IN PUŁAWY IN THE YEARS 1969–1989

Summary

The paper presents the problem of attenuation of the direct solar radiation in Puławy in the years 1969–1989. The extinction was expressed with the help of the Linke's turbidity factor counted on the basis of measurements of the direct solar irradiance at the Institute of Soil Science and Plant Cultivation in the years 1969–1989. The turbidity factor was counted and reduced to 2 optical mass of the atmosphere according to the method proposed by Grenier et al. (6). The mean value of the turbidity factor for the atmosphere in the study period was in the class of raised turbidity and equalled 3.41. However, an improvement was noted in the optical conditions of the atmosphere expressed by the decrease of the value of Linke's turbidity factor during the whole study period. The annual course of the turbidity is typical, i.e. it increases in the warm half-year and decreases in the cold half-year. In the daily course, the mean turbidity of the atmosphere increases with the altitude of the Sun above the horizon. The atmospheric turbidity also depends on the kind of the air masses present. During the study period in Puławy, the lowest value of the atmospheric turbidity occurred in the case of arctic air masses (2.79), while the highest in tropical air (4.05). Polar-continental and polar-maritime air masses are characterised by similar turbidity level of the atmosphere, 3.44 and 3.50, respectively.

Praca wpłynęła do Redakcji 23 XI 2005 r.