

Jerzy Boryczka, Wincenty Okołowicz

ZALEŻNOŚĆ NATEŻENIA OŚWIETLENIA OD WYSOKOŚCI SŁOŃCA PRZY RÓŻNYM STOPNIU ZACHMURZENIA W PORZE LETNIEJ

Promienie słoneczne przenikając przez atmosferę do powierzchni Ziemi ulegają selektywnej absorpcji i rozproszeniu. Jedynym mechanizmem przenoszenia światła jest tutaj rozpraszanie. Wiązka światła przenikając na pewną głębokość do atmosfery ulega osłabieniu. Współczynnik przedstawiający część promieniowania usuniętego z wiązki w procesach pochłaniania i rozpraszania nazywany jest ekstynkcją ($K = \kappa + \sigma$). Jeśli strumień światła przed wejściem do atmosfery wynosił πF to na głębokości s wyniesie.

$$\pi F e^{-Ks \sec z} \quad [1];$$

gdzie: z — odległość zenitalna.

Dowolna płaszczyzna umieszczona pod pewnym kątem do kierunku promieni słonecznych oświetlona jest przez bezpośrednią, osłabioną wiązkę światła oraz przez światło rozproszone nadchodzące ze wszystkich kierunków.

Jeśli niebo pokryte jest chmurami, promienie słoneczne są również pochłaniane i rozpraszane przez cząstki skondensowanej pary wodnej zawartej w chmurze. Osłabienie promieniowania w tym przypadku zależy nie tylko od grubości optycznej atmosfery ($\tau_v = \int_0^D K_v ds$), ale również od grubości warstwy chmur i jej budowy tj. wodności, wielkości kropelek wody itp. Wielkość oświetlenia płaszczyzny poziomej umieszczonej w pobliżu warstwy chmur zależy również od jej wysokości.

W celu wykazania w jakim stopniu w porze letniej zachmurzenie wpływa na wielkość oświetlenia, przeanalizowano około 800 pomiarów nateżenia oświetlenia, wykonanych w miesiącu lipcu 1963 roku w miejscu o współrzędnych: $\varphi = 53^\circ 45'$, $\lambda = 1^h 27^m$, przy różnym położeniu Słońca i różnym zachmurzeniu. Pomiarów dokonano luksometrem Zeiss'a, mierząc nateżenie oświetlenia na płaszczyznę poziomą w codziennych odstępach czasu od świtu do zmierzchu, kiedy to jeszcze wielkość oświetlenia

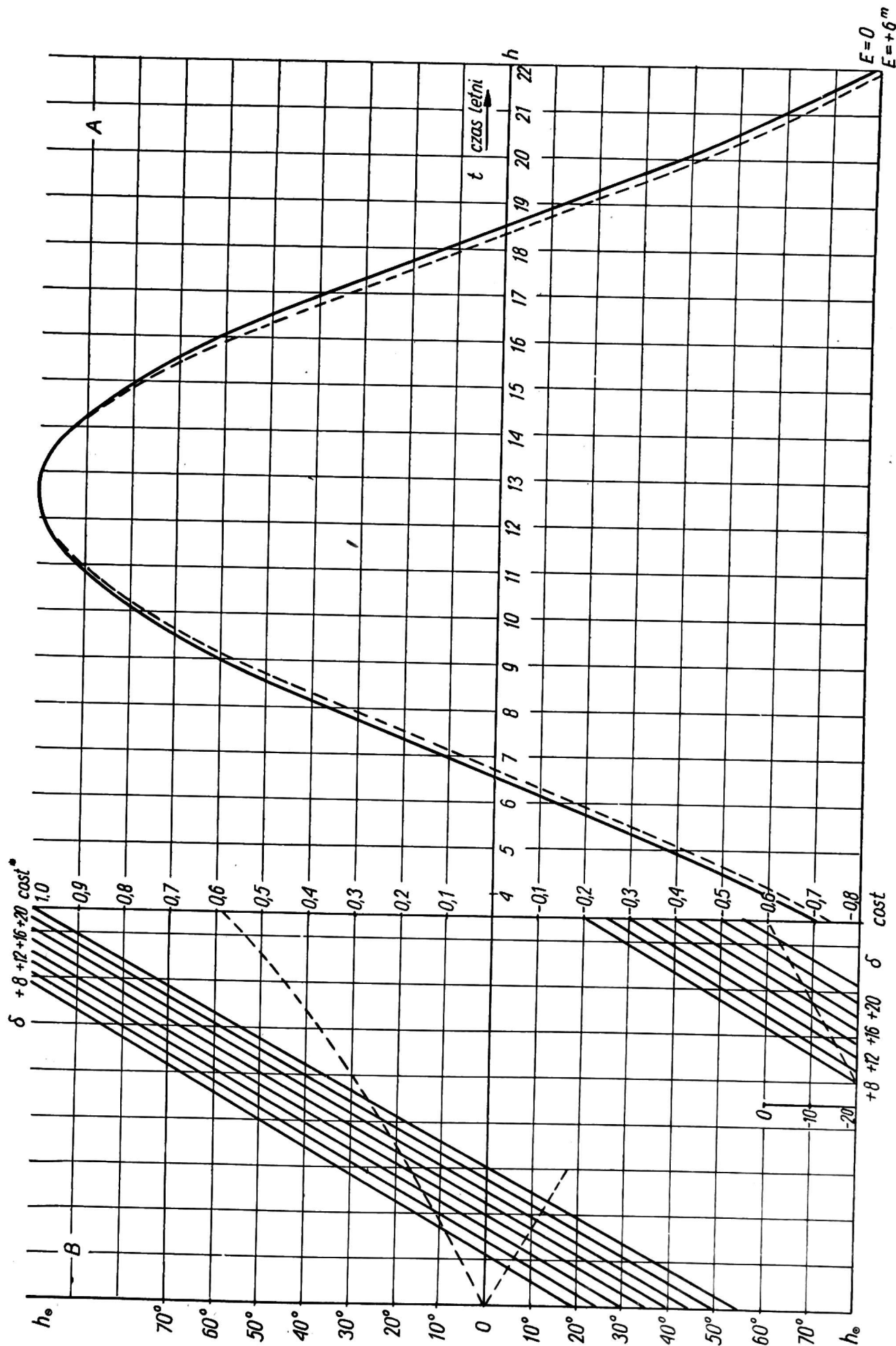


Fig. 1

Nomogramy służące do wyznaczania wysokości Słońca, (sporządzone dla miejsca o współrzędnych $\varphi = 53^{\circ}45'$, $\lambda = 1h27m$)
 Nomograms for determining solar altitudes, (prepared for locality with geographical coordinates $\varphi = 53^{\circ}45'$, $\lambda = 1h27m$)

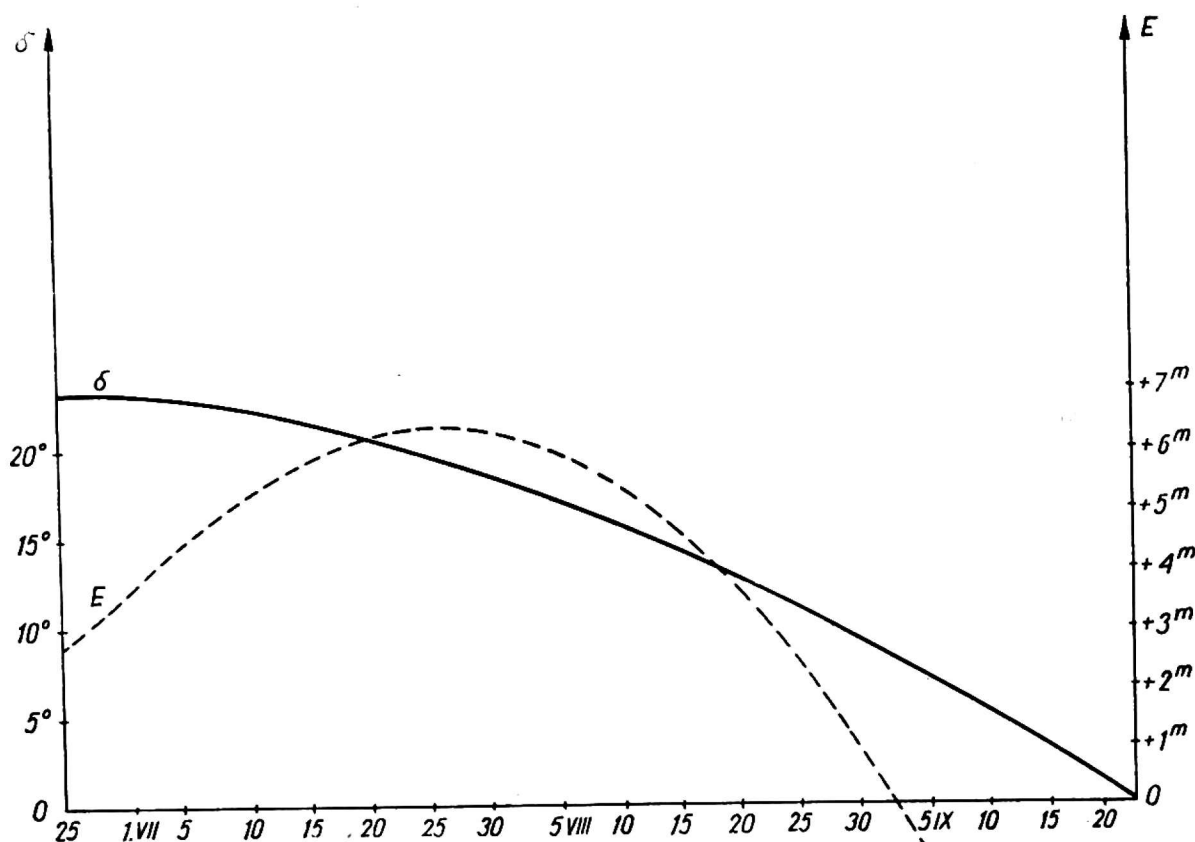


Fig. 2

Przebieg deklinacji Słońca i równania czasu E w miesiącach letnich (rok 1963)
 Course of sun declination and equinox E in summer months (1963)

mieściła się w granicach czułości przyrządu. W pobliżu wschodów i zachodów Słońca wielkość oświetlenia mierzono co 15 minut.

W celu ujednoczenia danych obserwacyjnych i uchwycenia zmian oświetlenia jedynie w zależności od stopnia zachmurzenia, zamiast współrzędnych J, t (J — natężenie oświetlenia, t — czas), wprowadzono współrzędne J, h_0 (h_0 — wysokość Słońca). Wysokości Słońca h_0 w chwili każdego pomiaru oświetlenia wyznaczano ze specjalnie sporządzonych nomogramów (fig. 1).

Aby wyznaczyć wysokość Słońca w chwili t_0 czasu letniego, należy przez punkt $(t_0, \cos t_0^*)$ — część wykresu A, poprowadzić równoległą do osi t^* . Z punktu przecięcia się tej prostej z odpowiednią prostą w części wykresu B (każda z prostych odpowiada innej wartości deklinacji Słońca) prowadzimy równoległą do osi $\cos t^*$. Przecięcie tej drugiej równoległej z krzywą $\sin h_0$ (przerwaną) wyznacza na osi pionowej wartość wysokości Słońca h_0 . Jeśli Słońce znajduje się pod horyzontem, wtedy wysokości $h_0 < 0^\circ$ wyznacza się podobnie, korzystając z dolnej części wykresu B (pionowa skala $0^\circ, -10^\circ, -20^\circ$). Wartości deklinacji Słońca i równania czasu dla dni letnich przedstawia fig. 2.

Powyższe nomogramy można również wykorzystywać w przeciwnym kierunku, tzn. wyznaczać czas kiedy Słońce ma osiągnąć z góry określoną wysokość, np. wyznaczać czas wschodów i zachodów Słońca. Zależnie od

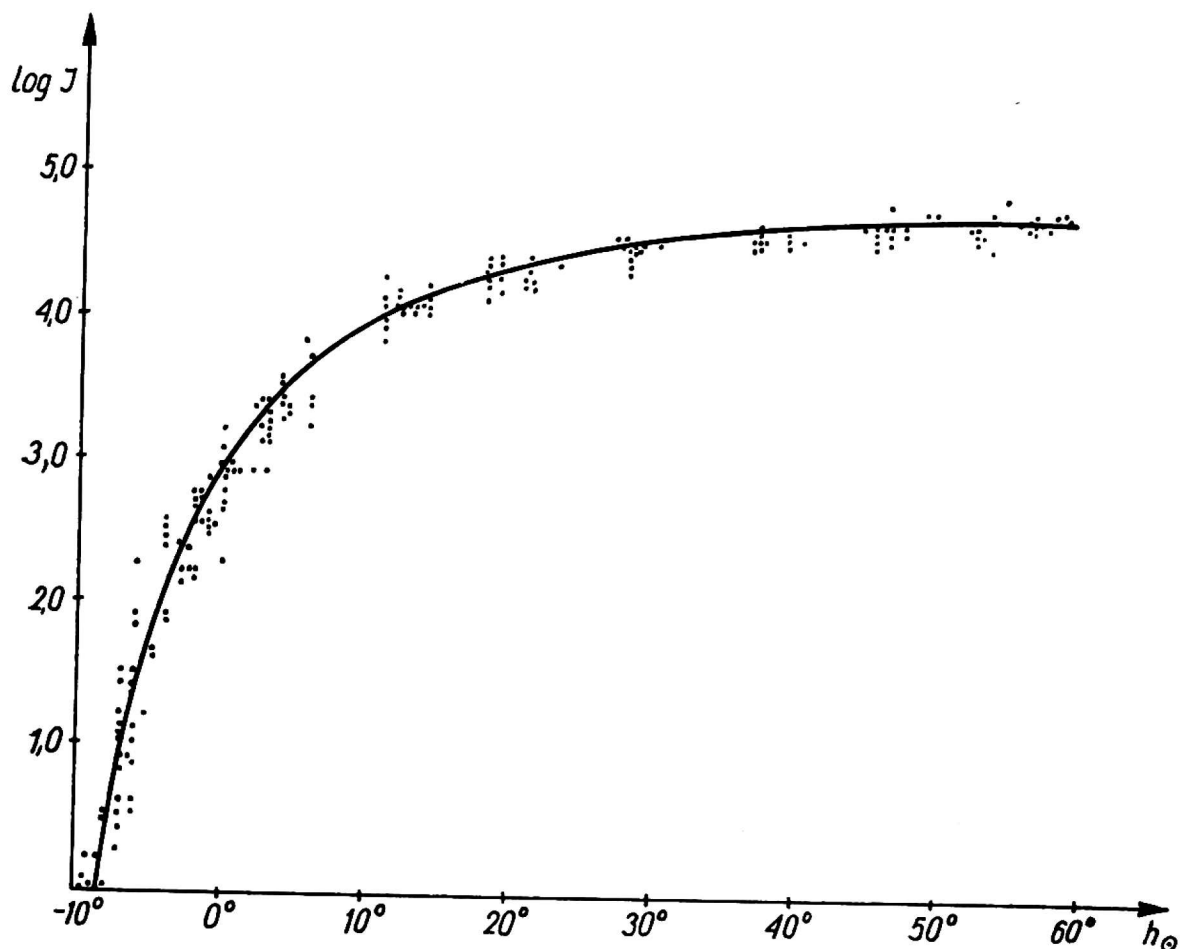


Fig. 3

Zależność natężenia oświetlenia od wysokości Słońca przy niebie pogodnym, zachmurzenie 0—2

Dependence of solar intensity on solar altitude, with clear sky, clouding 0—2

miejsca obserwacji ulegną zmianie również proste $y = a + bx$, $a = \sin \varphi \sin \delta$, $b = \cos \varphi \cos \delta$, φ — szerokość geograficzna, δ — deklinacja Słońca, jak również przesunięciu ulegnie skala czasowa funkcji $\cos t^*$. Sporządzenie powyższych nomogramów może mieć jeszcze większe znaczenie przy analizie dużej ilości obserwacji, wykonanych w różnym czasie i w różnych miejscowościach.

Nanosząc na płaszczyznę $\log J$, h_0 wartości natężeń oświetlenia 200 pomiarów, wykonanych przy zachmurzeniu nieba 0—2 (fig. 3), okazuje się, że punkty układają się dość ściśle wzdłuż krzywej, która przypomina w tym układzie współrzędnych wykres funkcji logarytmicznej. Z kształtu tej krzywej można wnioskować, że zależność natężenia oświetlenia od wysokości Słońca dla dużych wysokości h_0 w przybliżeniu jest liniowa.

Można również zauważyć, że rozrzut punktów przy mniejszych wysokościach jest większy. Jak się okaże później, rozrzut ten jest przede wszystkim wynikiem różnej widoczności linii horyzontu od strony wschodniej i zachodniej.

Dla porównania na fig. 4 przedstawiono jak kształtuje się zależność oświetlenia od wysokości Słońca przy typowych dniach pochmurnych.

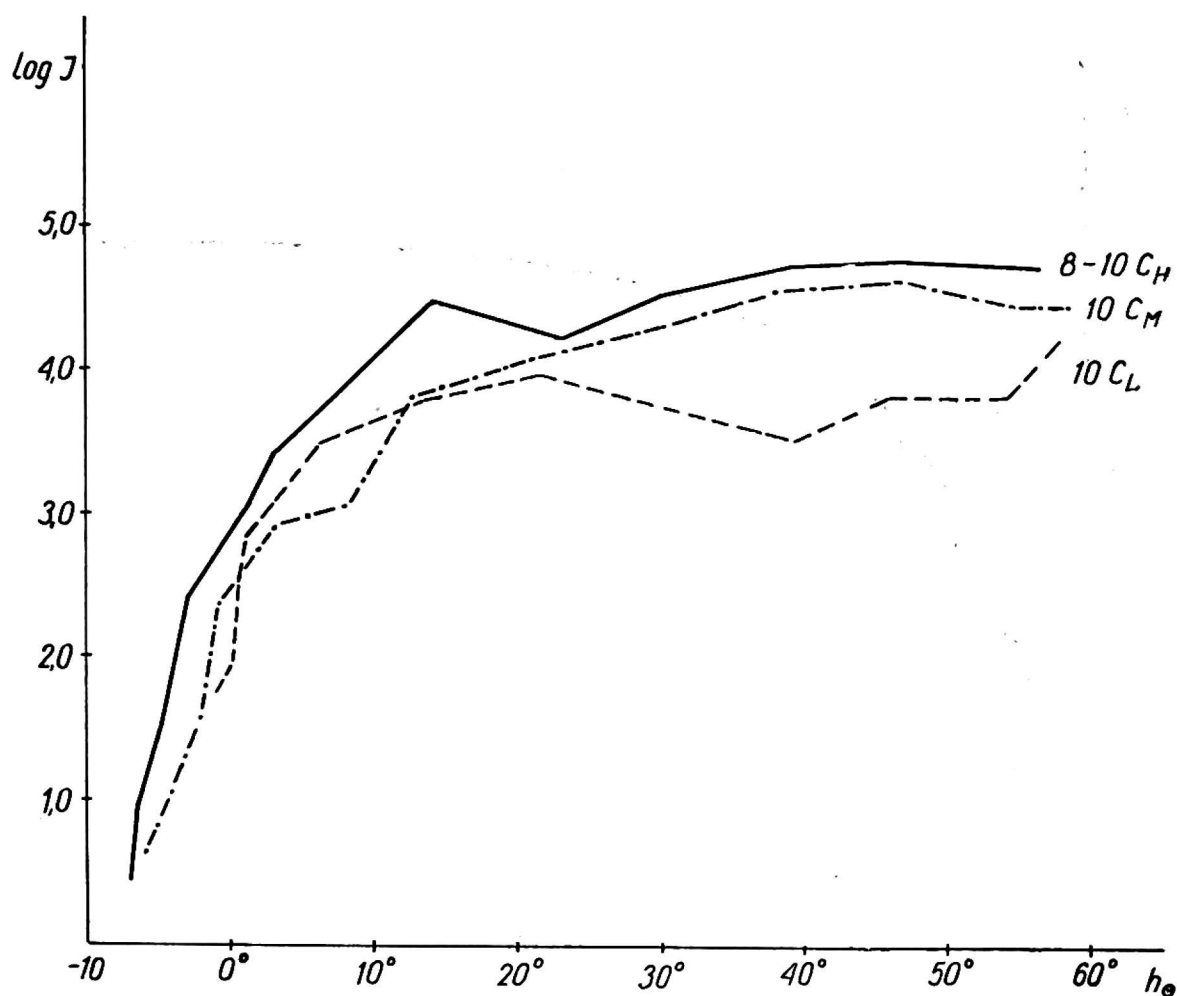


Fig. 4

Zależność natężenia oświetlenia od wysokości Słońca dla dni pochmurnych o różnej wysokości chmur. — — — — — 2 lipca (przed górowaniem) — — — — — 4 lipca (po górowaniu) — . — . — 10 lipca (przed górowaniem)

Dependence of solar intensity on solar altitude for cloudy days with various cloud altitudes. — — — — — July 2 (before zenith position), — — — — — July 4 (after zenith position), — . — . — July 10 (before zenith position)

Zgodnie z przewidywaniami, najmniejsze wartości natężenia oświetlenia wystąpiły przy zachmurzeniu 10 — chmury niskie C_L i średnie C_M , największe zaś przy chmurach wysokich C_H z tym, że zróżnicowanie to wzrasta ze wzrostem wysokości Słońca. Największa różnica w tym przypadku wystąpiła przy $h_0 \approx 40^\circ$, gdzie natężenie oświetlenia przy chmurach wysokich było prawie 18-krotnie większe niż przy chmurach niskich. Podejrzewając, że ten większy rozrzut punktów przy mniejszych wysokościach Słońca (fig. 3) może wynikać z różnej widoczności horyzontu, naniesiono na płaszczyznę $\log J, h_0$ — oddzielnie wartości natężeń oświetlenia z pomiarów wykonanych przed południem i oddzielnie z pomiarów popołudniowych. Zależność średnich wartości natężenia oświetlenia od wysokości Słońca dla stanu nieba pogodnego i pochmurnego przedstawiają fig. 5 i 6.

Z rysunków powyższych widać, że zasłonięcie linii horyzontu przez przeszkody terenowe dało wymierzalne różnice w wartościach natężenia

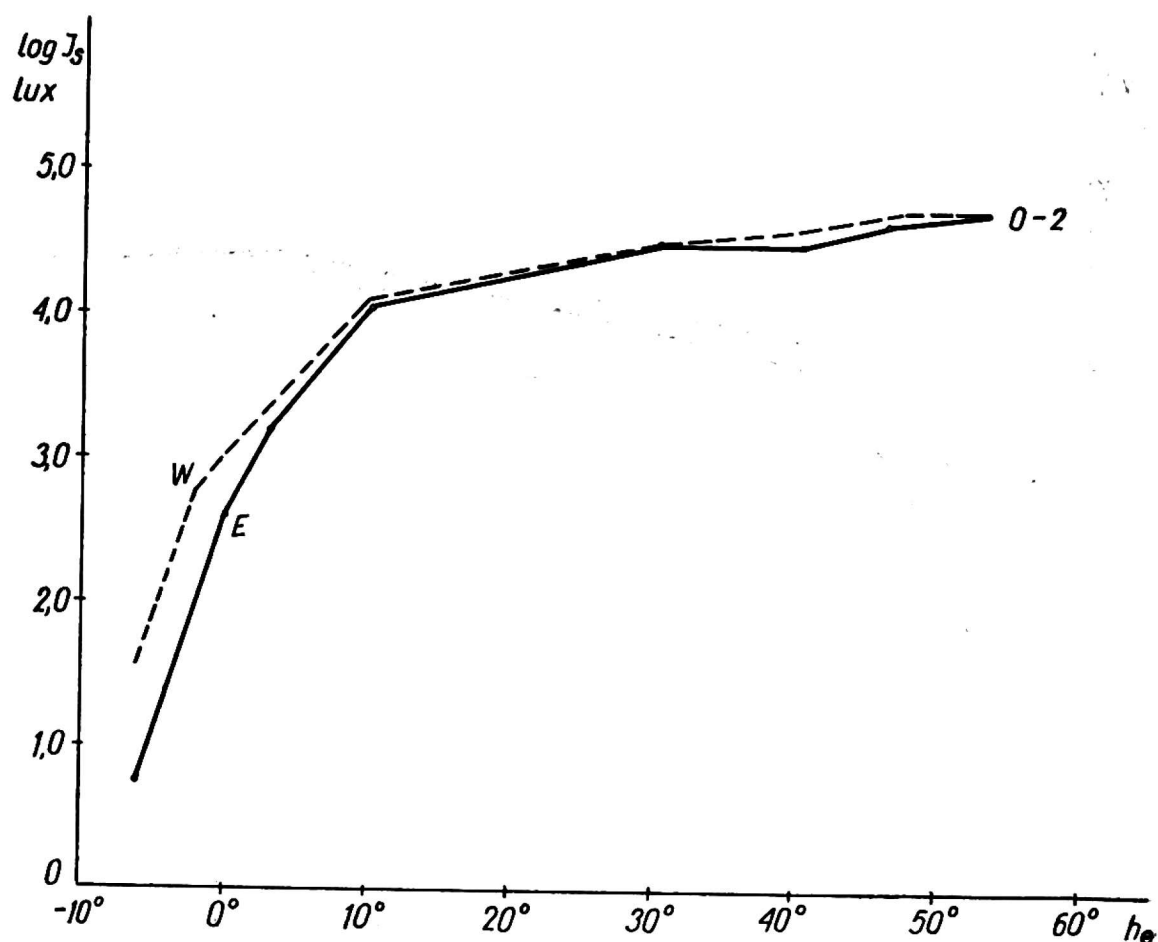


Fig. 5

Zależność średnich wartości natężenia oświetlenia (wyrażone w luksach) od wysokości Słońca dla pogodnego nieba (zachmurzenie 0—2) ————— pomiary wykonane przed górowaniem Słońca, - - - pomiary wykonane po górowaniu Słońca
 Dependence of mean values of solar intensity (in lux) on solar altitude, for clear sky (clouding 0—2) ————— measurements made before zenith, - - - measurements made after zenith

oświetlenia, zarówno przy niebie pogodnym jak i zachmurzonym, do chwili, kiedy Słońce osiągnęło wysokość $h_o \approx 30^\circ$. Dla nieba pogodnego stosunki natężeń oświetlenia z pomiarów przedpołudniowych do popołudniowych średnio biorąc wyniosły: $h_o \approx -5^\circ$, $J_W/J_E = 9,0$; $h_o = 0^\circ$, $J_W/J_E = 6,0$; $h_o = +5^\circ$, $J_W/J_E = 1,7$; $h_o = +10^\circ$, $J_W/J_E = 0,7$. Analogicznie dla nieba pochmurnego otrzymano: $h_o = -5^\circ$, $J_W/J_E = 1,0$; $h_o = 0^\circ$, $J_W/J_E = 7,8$; $h_o = +5^\circ$, $J_W/J_E = 3,0$; $h_o = +10^\circ$, $J_W/J_E = 4,0$; $h_o = +20^\circ$, $J_W/J_E = 1,8$; $h_o = 30^\circ$, $J_W/J_E = 1,0$.

Podane wartości stosunków natężeń oświetlenia J_W/J_E , o czym już była wzmianka, uwarunkowane są położeniem miejsca obserwacji. Pomiary wykonywane były na wzniesieniu, gdzie od strony wschodniej w odległości około 300 m znajdował się skrawek lasu, od zachodniej zaś gładka powierzchnia j. Śniardwy. Otrzymane wyniki mogą świadczyć o tym, że przy tego rodzaju opracowaniach należy zwracać szczególną uwagę na otoczenie miejsca obserwacji.

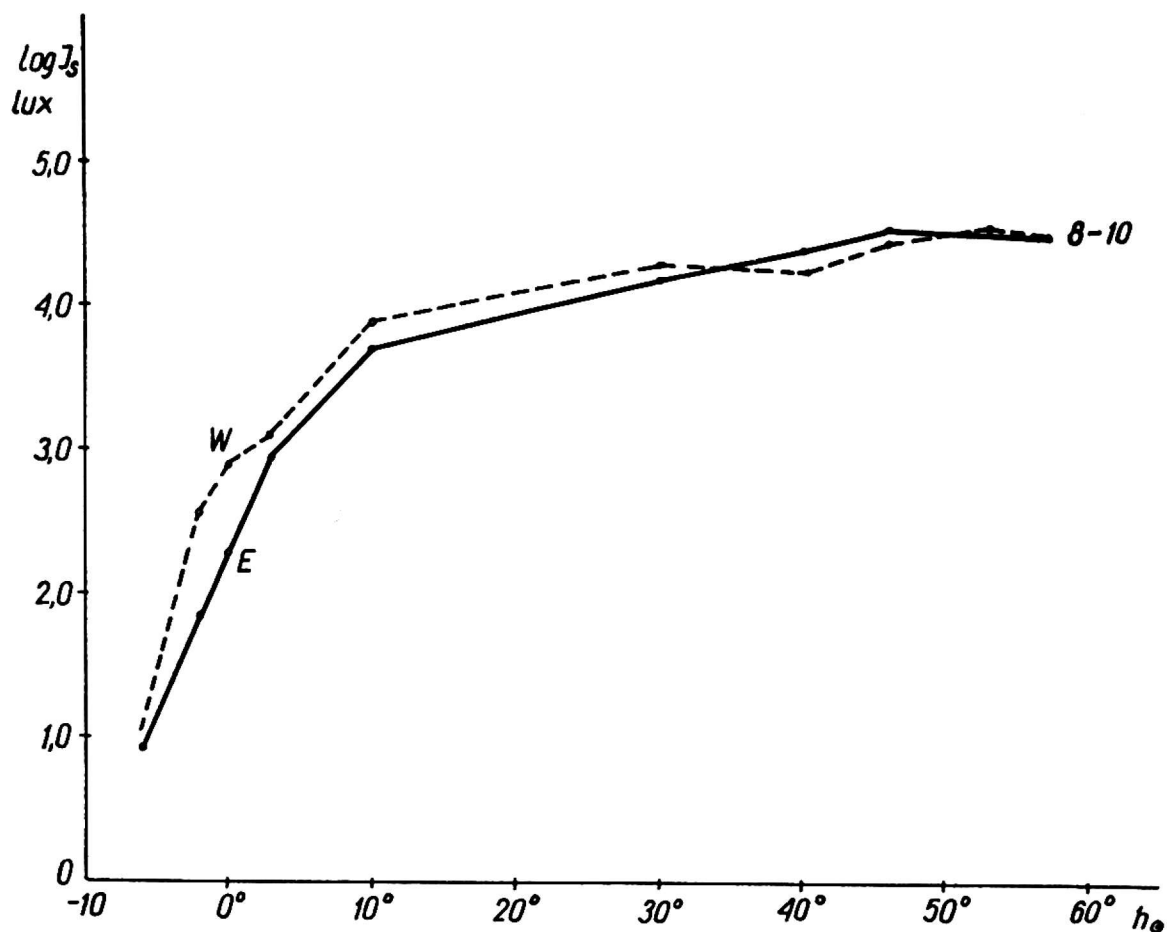


Fig. 6

Zależność średnich wartości oświetlenia (J w luksach) od wysokości Słońca dla nieba pochmurnego (zachmurzenie 8—10) ————— pomiary wykonane przed górowaniem Słońca, — — — pomiary wykonane po górowaniu Słońca

Dependence of mean values of solar intensity (J in lux) on solar altitude for cloudy sky ————— measurements made before zenith, — — — — — measurements made after zenith

W celu bliższego zbadania zależności natężenia oświetlenia od wysokości Słońca, naniesiono na płaszczyznę J, h_0 (fig. 7, 8) średnie wartości pomiarów oświetlenia przy niebie pogodnym — zachmurzenie 0—2, przy pokryciu połowy nieba przez chmury — zachmurzenie 4—6 (z tym, że wydzielono pomiary, kiedy Słońce było widoczne) oraz przy niebie pochmurnym — zachmurzenie 8—10. We wszystkich przypadkach nie brano pod uwagę rodzaju chmur.

Ogólnie biorąc, we wszystkich przypadkach dla wysokości Słońca większych od 20° otrzymuje się w przybliżeniu liniowe zależności, tzn. przyrosty natężenia oświetlenia wraz z wysokością prawie nie zmieniają się. Wraz ze wzrostem zachmurzenia współczynniki kierunkowe tych quasi-prostych są coraz to mniejsze i w przyjętym układzie współrzędnych odpowiednio wynoszą: na podstawie pomiarów wykonanych po południu — $n_{0-2} = 0,9$, $n_{4-6}^{\circ} = 0,7$, $n_{4-6}^{\bullet} = 0,7$, $n_{8-10} = 0,5$; na podstawie pomiarów wykonanych przed południem — $n_{0-2} = 1,0$, $n_{4-6}^{\circ} = 0,8$, $n_{4-6}^{\bullet} = 0,8$, $n_{8-10} = 0,5$. Oznacza to, że średnio biorąc, przyrostom wysokości Słońca o 1° (dla

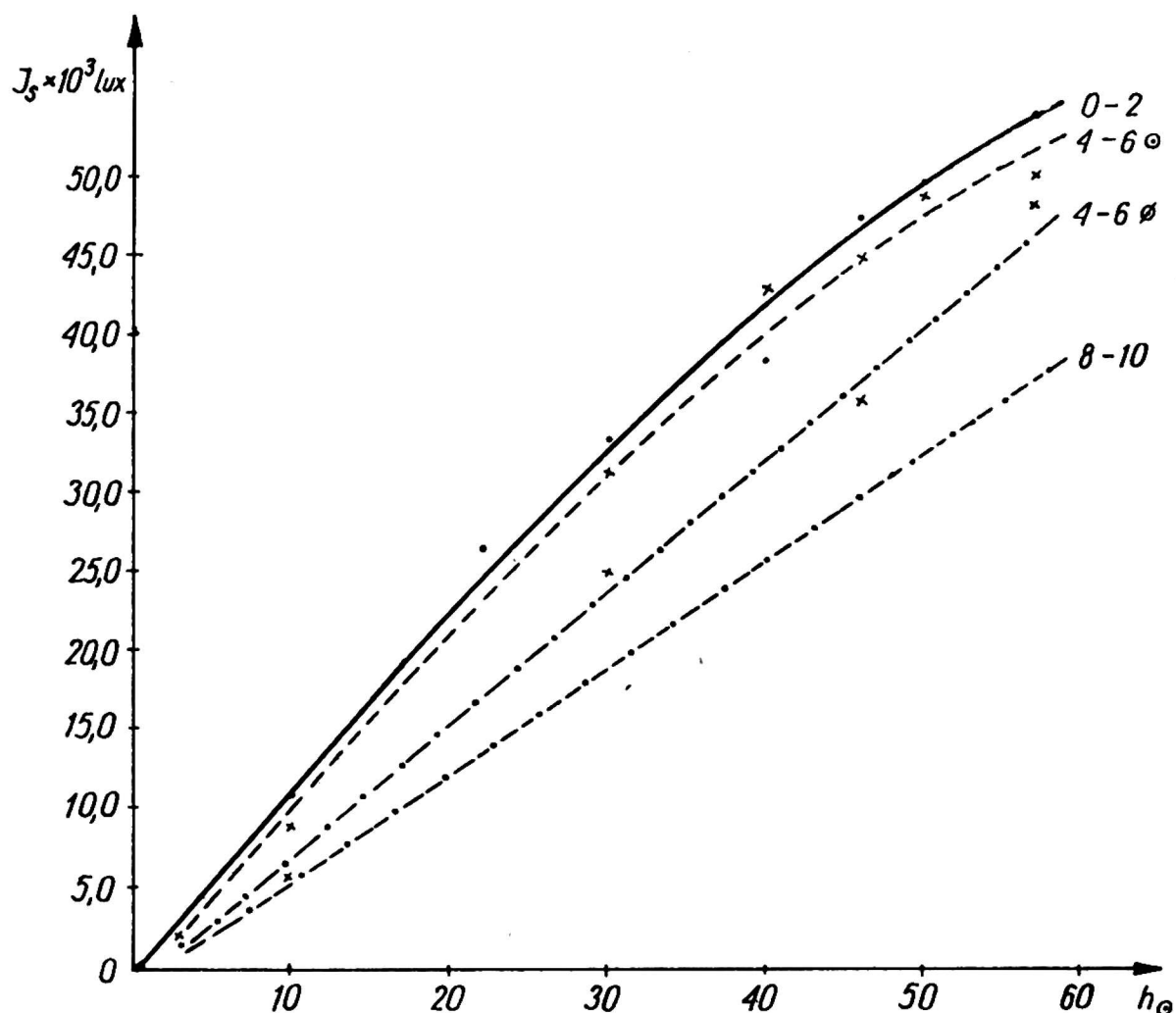


Fig. 7

Zależność natężenia oświetlenia od wysokości Słońca (na podstawie obserwacji przedpołudniowych), — zachmurzenie 0—2, — — — zachmurzenie 4—6 (widoczne słońce), — · — zachmurzenie 4—6 (niewidoczne Słońce), — · · — zachmurzenie 8—10

Dependence of solar intensity on solar altitude (on the basis of observations made a. m.) — clouding 0—2, — — — clouding 4—6 (sun visible), — · — clouding 4—6 (sun invisible), — · · — clouding 8—10

$h > 20^\circ$) odpowiadają przyrosty natężenia oświetlenia 900 lux, 700 lux itd. Z powyższych liczb widać dalece idącą zgodność wyników otrzymanych na podstawie różnych serii pomiarów. Należy podkreślić, że wyniki stanowią średnią z około 400 pomiarów wykonanych przed południem i ponad 400 wykonanych po południu. Zarówno w pierwszym jak i w drugim przypadku przy zachmurzeniu nieba 4—6 uzyskano te same współczynniki kierunkowe niezależnie od tego czy Słońce było widoczne czy też nie¹. Równoległość tych dwóch krzywych najwyraźniej widoczna jest na fig. 8.

Przy niebie częściowo pokrytym chmurami oświetlenie płaszczyzny

¹ Indeks dolny oznacza wielkość zachmurzenia, górny widoczność Słońca przez chmury; ○ — widoczne, ● — niewidoczne.

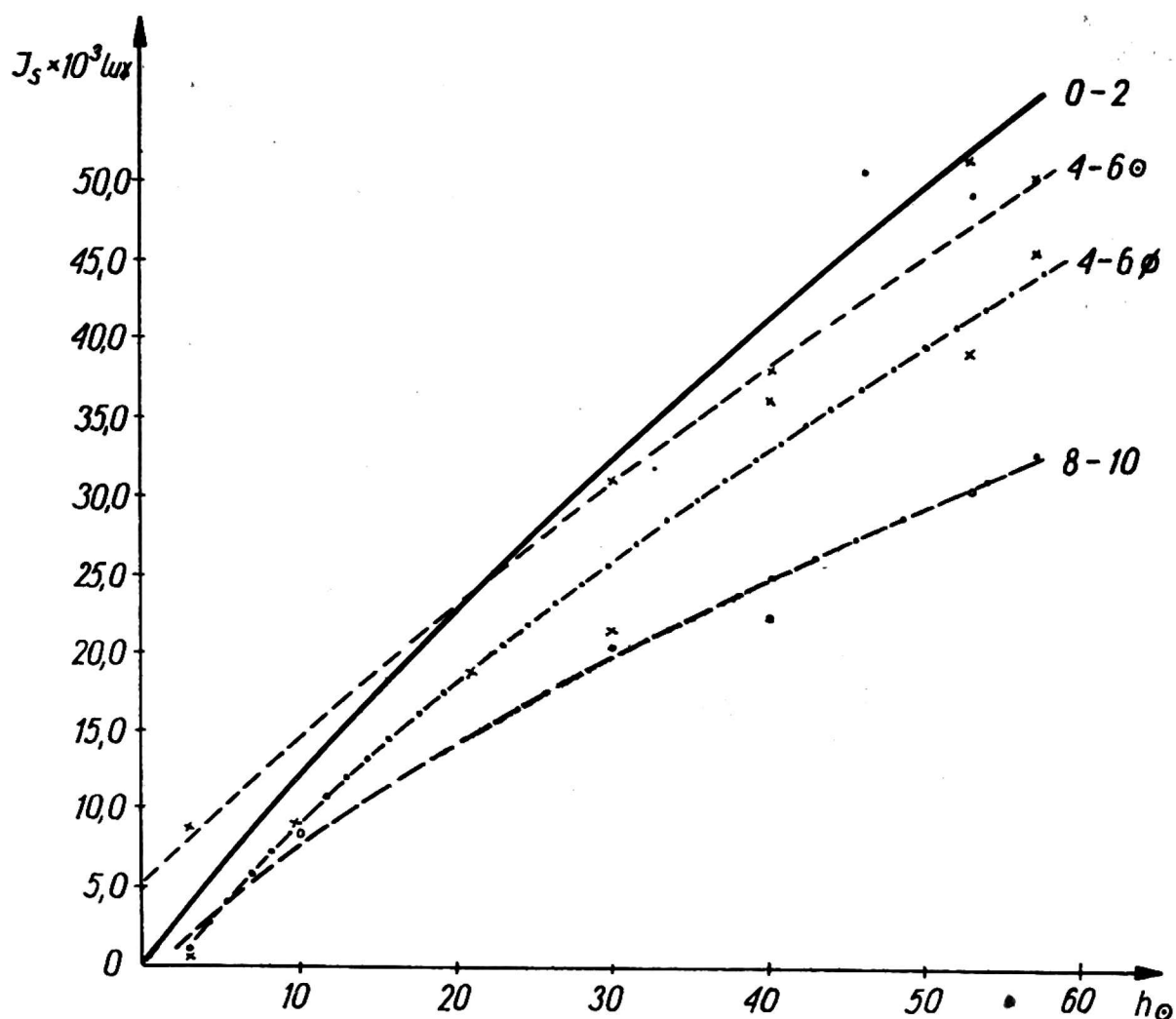


Fig. 8

Zależność natężenia oświetlenia od wysokości Słońca (na podstawie obserwacji popołudniowych). Oznaczenia jak na fig. 7

Dependence of solar intensity on solar altitude (on the basis of observations made p.m.). Markings as for Fig. 7

poziomej jest wynikiem padania na nią bezpośredniej, osłabionej wiązki światła i światła rozproszonego.

$$\Phi = \Phi_R + \Phi_R^* + \pi F e^{-\frac{\tau}{\sinh h_0}}$$

Φ — całkowity strumień światła,

Φ_R^* — strumień światła rozproszonego przez chmury.

Φ_R — strumień światła rozproszonego przez atmosferę,

W przybliżeniu można przyjąć, że kształt funkcji $\Phi(h_0)$ jest zbliżony do krzywej wykreślonej dla nieba pogodnego — zachmurzenie 0—2 (fig. 8). Na figurze tej widoczne jest przecięcie tej krzywej (linia ciągła) w pobliżu $h_0 \approx 20^\circ$ z krzywą sporządzoną dla zachmurzenia 4—6 przy widocznym Słońcu (linia przerywana). Oznacza to, że przy małych wysokościach Słońca, $h_0 < 20^\circ$, oświetlenie płaszczyzny poziomej jest większe przy niebie częściowo pokrytym chmurami. Przyjmując, że strumień

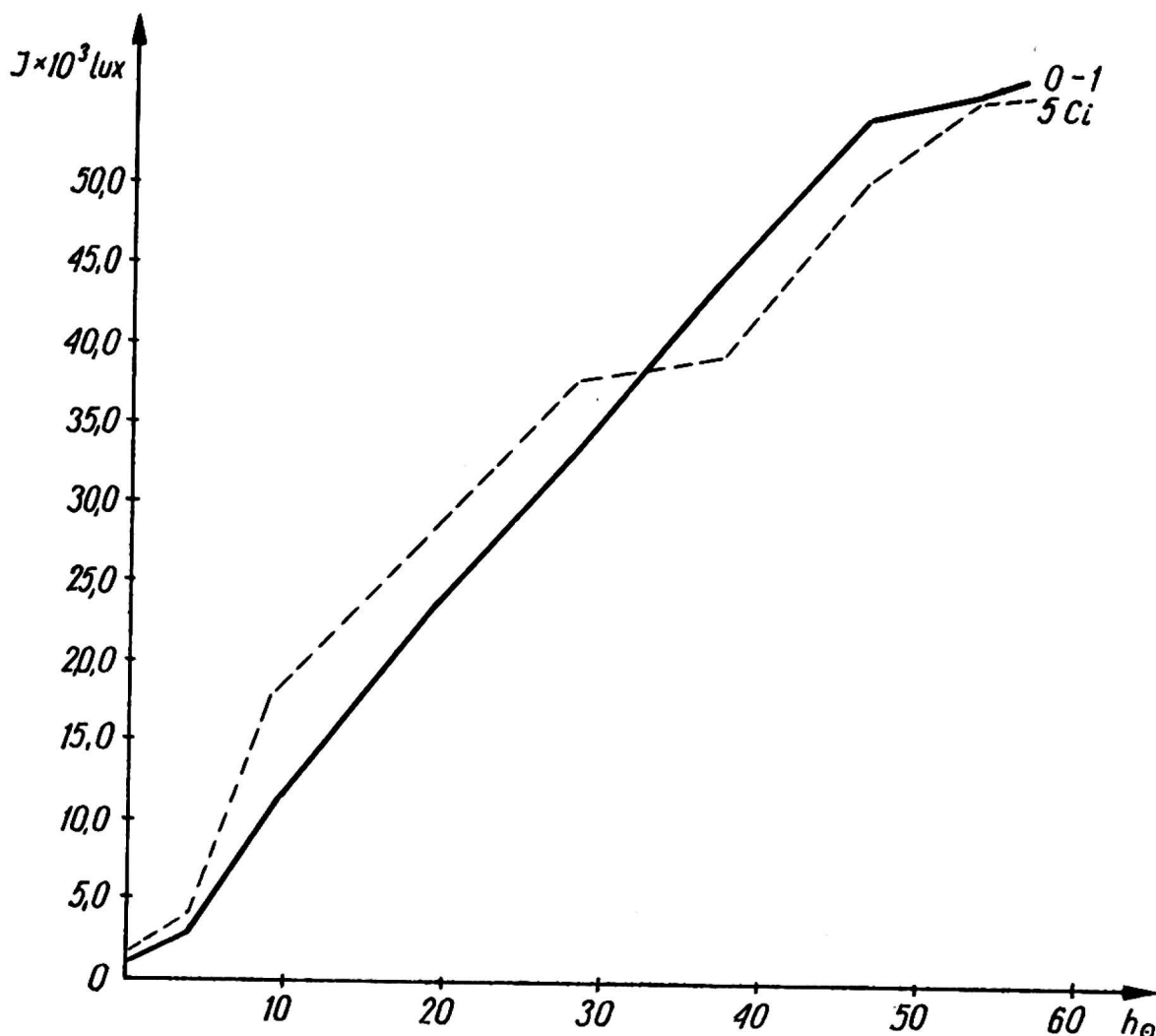


Fig. 9

Zależność oświetlenia od wysokości Słońca ——— dni pogodne (21, 22, 24 lipca 1963 r.),
 — — — dzień chmurny — zachmurzenie 5 C_H (July 23)

Dependence of solar intensity on solar altitude ——— clear days (July 21, 22, 24, 1963), — — — cloudy day, clouding 5 C_H (July 23)

wiązki bezpośredniej jest taki sam, jak przy niebie pogodnym, można przypuszczać że wzrost ten wynika ze wzrostu strumienia Φ_R^* . Przy większych wysokościach Słońca, ze względu na kierunek padania promieni w stosunku do warstwy chmur, niewiele wzrasta strumień Φ_R^* , a wartość strumienia Φ_R maleje (absorpcja światła rozproszonego przez chmury), prowadząc w rezultacie do mniejszych natężeń oświetlenia. Bardziej widoczne jest to na fig. 9, gdzie naniesiono średnie wartości oświetlenia z trzech pogodnych dni oraz dnia o zachmurzeniu 5 z chmurami C_H (dane z obserwacji popołudniowych).

Przecięcie się krzywych występuje tutaj przy $h_0 \approx 30^\circ$. Oznacza to, że wartość strumienia Φ_R^* przy częściowym zachmurzeniu nieba przez chmury wysokie C_H jest bardzo duża.

Analizując przebieg natężenia oświetlenia w pobliżu wschodów i zachodów Słońca (fig. 10, 11), można stwierdzić, że natężenie oświetlenia równe jest zeru w czasie około 1 godziny przed wschodem Słońca i około

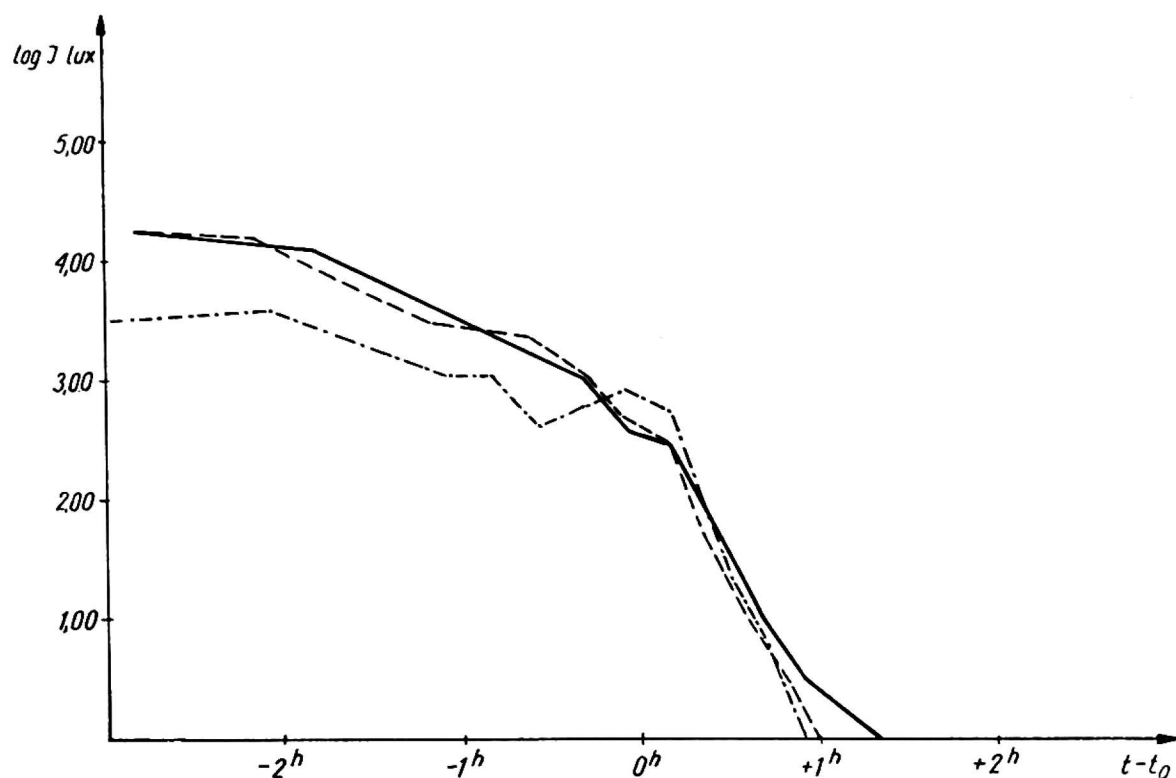


Fig. 10

Zależność natężenia oświetlenia od czasu $t - t_E$ dla wybranych dni, t_E — czas wschodu Słońca, ——— zachmurzenie 0—2 (5 lipca), ——— zachm. 10 $A_c A_s$, —·—·— zachm. 10 $C_u S_c$ (2 lipca)

Dependence of solar intensity on time $t - t_E$ for selected days, t_E — time of sunrise, ——— clouding 0—2 (July 5), ——— clouding 10 $A_c A_s$, —·—·— clouding 10 $C_u S_c$ (July 2)

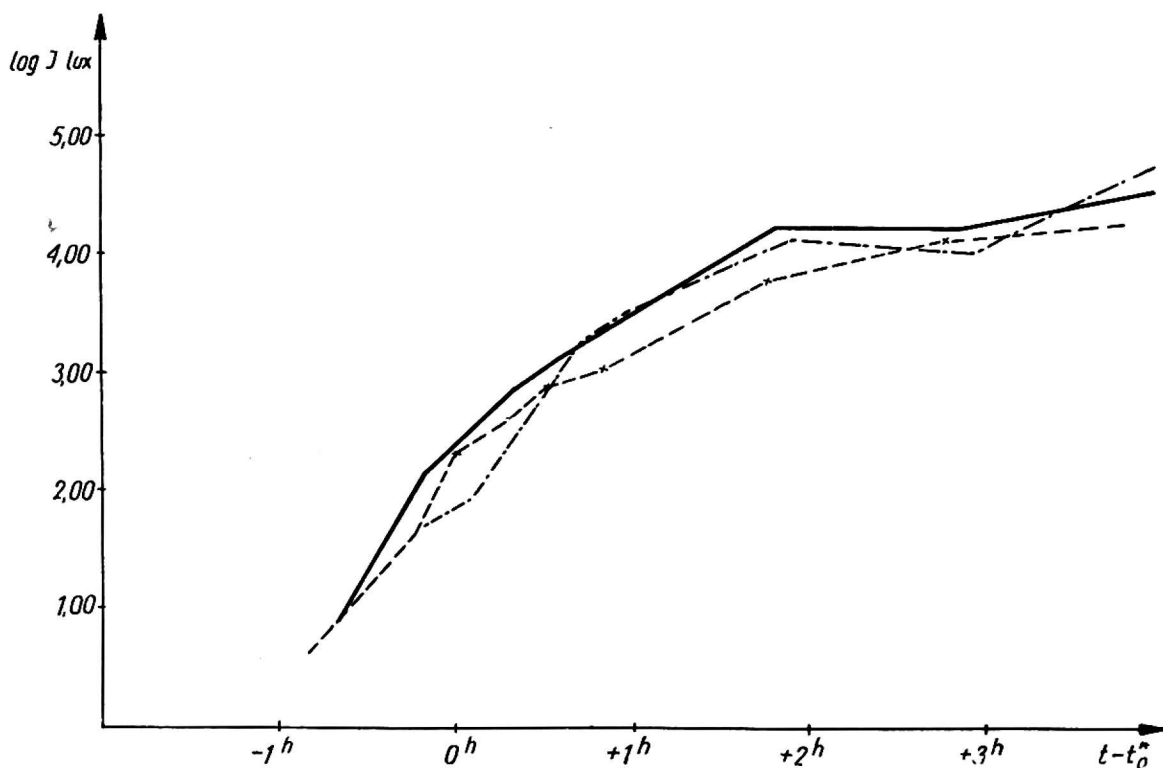


Fig. 11

Zależność natężenia oświetlenia od czasu $t - t_w$ dla wybranych dni, t_w — czas zachodu Słońca, ——— zachm. 0 (21 lipca), ——— zachm. 8—10 $C_i C_s$ (4 lipca), —·—·— zachm. 8—10 $C_u S_c$ (6 lipca)

Dependence of solar intensity on time $t - t_w$ for selected days, t_w — time of sunset, ——— clouding 0 (July 21), ——— clouding 8—10 $C_i C_s$ (July 4), —·—·— clouding 8—10 $C_u S_c$ (July 6)

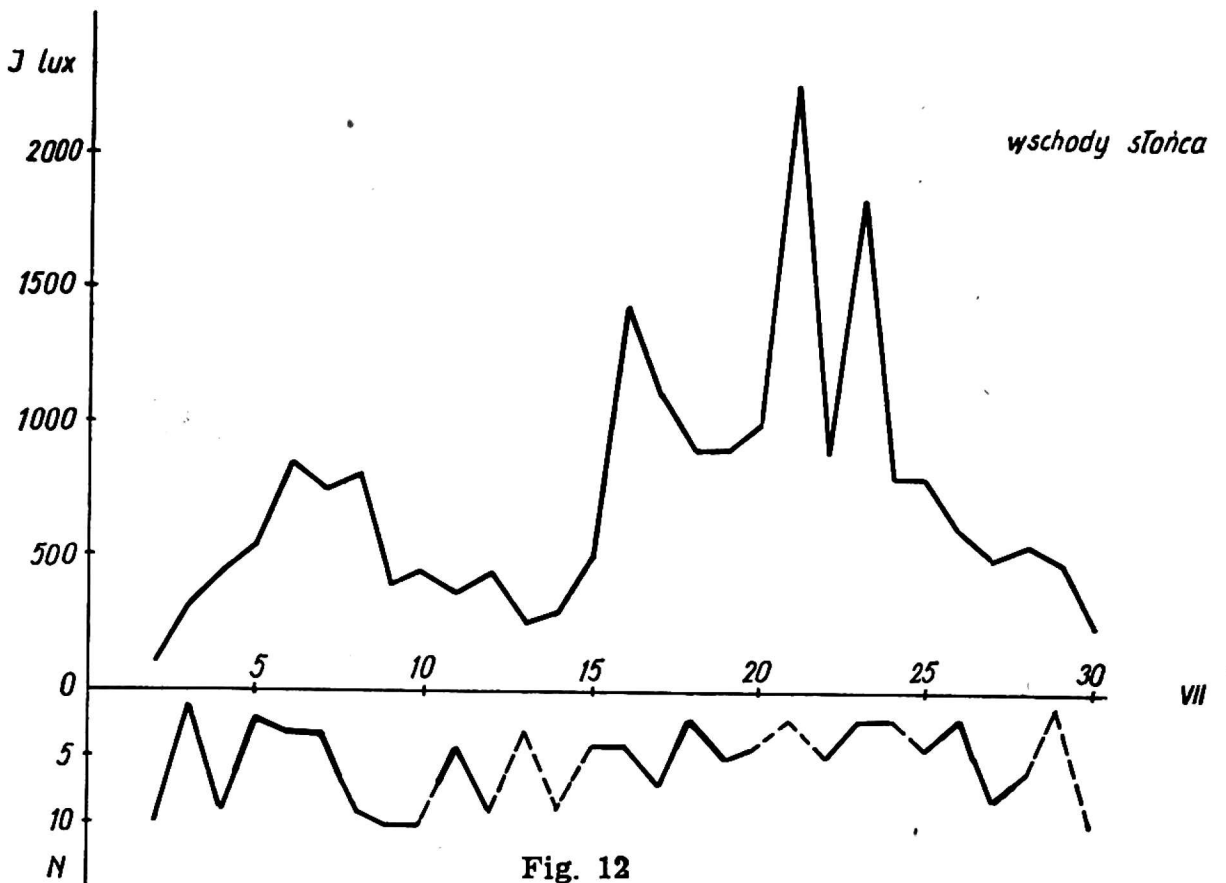


Fig. 12

Wartości natężenia oświetlenia podczas wschodów Słońca (lipiec 1963) ——— chmury wysokie C_H , ——— chmury niskie C_L , - - - - chmury średnie C_M
 Values of solar intensity during sunrise (July 1963) ——— high clouds C_H , ——— low clouds C_L , - - - - medium-height clouds C_M

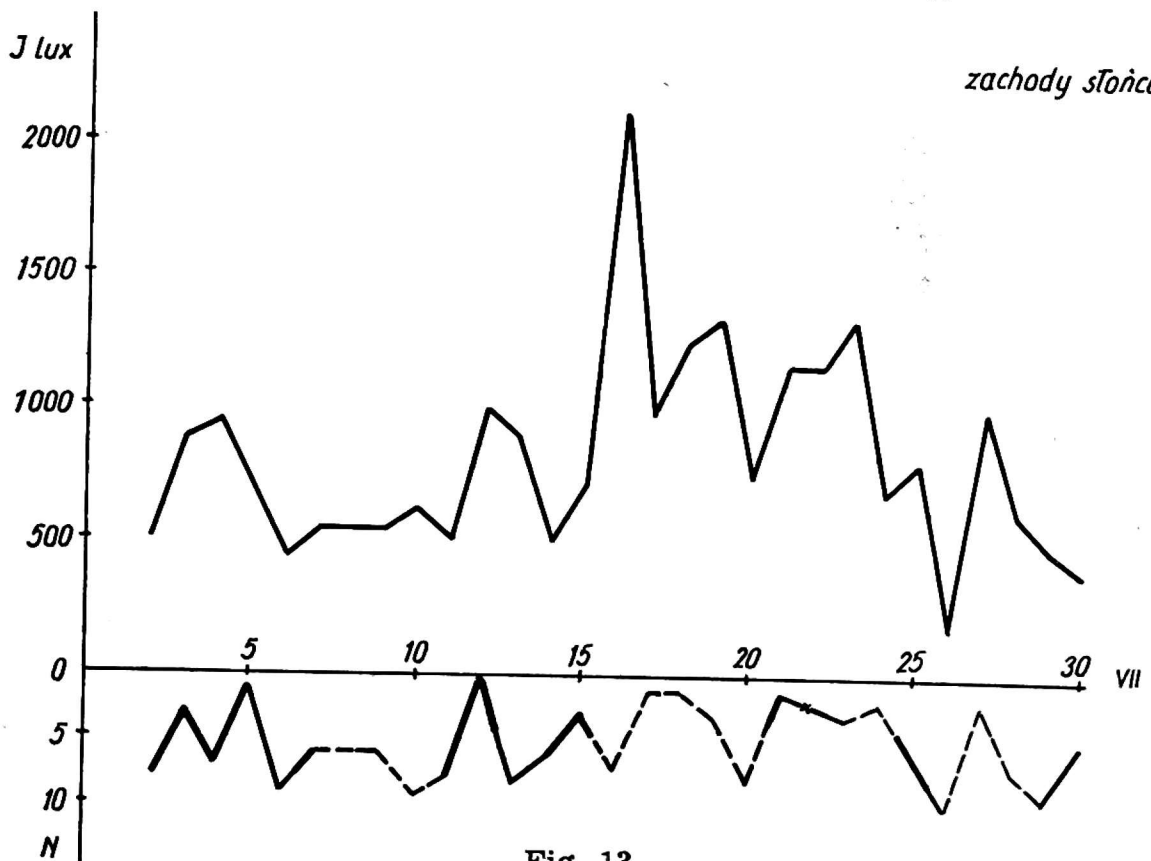


Fig. 13

Wartości natężenia oświetlenia podczas zachodów Słońca (lipiec 1963). Oznaczenia jak na fig. 12
 Values of solar intensity during sunset (July 1963). Markings as for Fig. 12

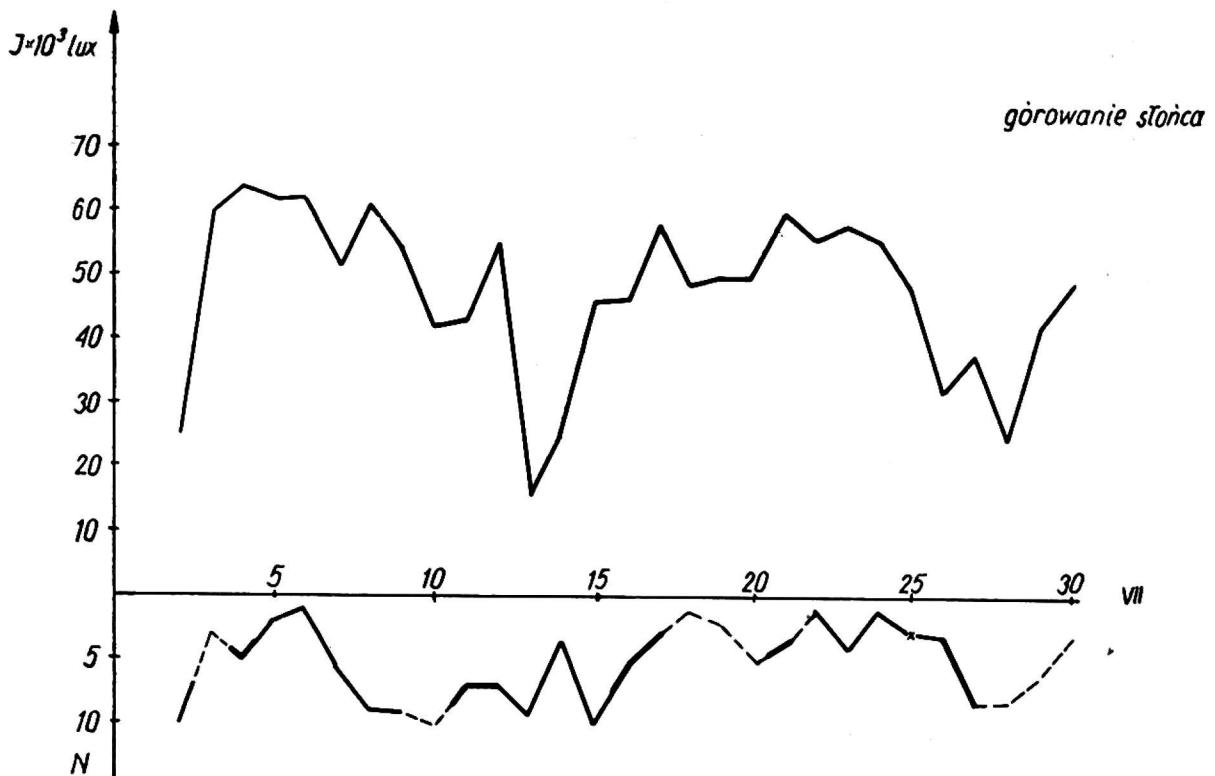


Fig. 14

Wartości natężenia oświetlenia podczas górowań Słońca (lipiec 1963 r.). Oznaczenia jak na fig. 12

Values of solar intensity sun in zenith position (July 1963). Markings as for Fig. 12

1 godziny po zachodzie. Zróznicowanie, zależnie od zachmurzenia, jest rzędu kilkunastu minut.

W niniejszym opracowaniu wyodrębniono zagadnienie wschodów i zachodów Słońca oraz jego górnej kulminacji. Wartość natężenia oświetlenia podczas wschodów, górowań i zachodów Słońca dla miesiąca lipca w roku 1963 w powiązaniu z wielkością zachmurzenia przedstawiają wykresy na fig. 12, 13 i 14.

Górna część wykresów przedstawia wartości natężenia oświetlenia wyrażone w luksach, dolna zaś zachmurzenie nieba, z tym, że oś zachmurzenia wszędzie skierowano w dół. W przyjętym układzie współrzędnych otrzymano dość wyraźną równoległość między krzywą oświetlenia i krzywą zachmurzenia, w szczególności przy zachmurzeniu niskim i średnim. Średnio biorąc, wartości natężenia oświetlenia zależnie od zachmurzenia wahały się: wschody — 500—1000 lux, zachody — 500—1250 lux, górowania — 30 000—60 000 lux.

W niniejszym opracowaniu brano pod uwagę wyłącznie wielkość zachmurzenia i wysokość chmur. Nie analizowano jak zmienia się oświetlenie w zależności od położenia chmur względem Słońca. Aby rozwiązać to zagadnienie, potrzebne są dokładne pomiary wielkości i rodzaju chmur.

Katedra Klimatologii równoległe do pomiarów oświetlenia prowadzi fotografie chmur. Do tego celu służy specjalne urządzenie, pozwalające

na uzyskanie zdjęć całego nieba, a tym samym wyznaczenie przybliżonych współrzędnych chmur. Zagadnienie to będzie tematem dalszych opracowań, wykonywanych w Katedrze Klimatologii z zakresu pomiarów promieniowania.

LITERATURA

- Akademia Nauk SSSR — Institut Fiziki Atmosfiery, *Proziektornyj łucz w atmosferie*, Izdatielstwo Akademii Nauk SSSR, Moskwa 1960.
- Chamberlain J. W., *Physics of the Aurora and Airglow*, Academic Press, New York and London 1961.
- H. C. van de Hulst, *Light Scattering by small Particles* New York — London 1957.
- Pienkowski S., *Fizyka Doświadczalna*, t. III, Optyka, PWN, Warszawa 1955.
- Rozienberg G. W., *Sumierki*, Gosudarstwiennoje Izdatielstwo Fiziko-Matematycznej Litieratury, Moskwa 1963 r.
- Słomka J., *Jasność nieba zmrokowego*, *Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny*, R. VII/1—2, Warszawa 1954.

Summary

In their paper the authors analyzed some 800 measurements of solar intensity, made during July 1963 at a location with the geographical coordinates $\varphi = 53^{\circ}45'$ and $\lambda = 1\text{h } 27\text{ min}$. These measurements were made by the use of a Zeiss luxometer, determining the solar intensity upon a horizontal plane at hourly intervals from dawn to nightfall; during periods when insolation was greater than the instrument's sensitivity, near sunrise and sunset, these values were determined every 15 minutes. On a surface $\log J, h_0$, where J = solar intensity in lux and h_0 = solar altitude, these values (a total of some 200) were plotted when clouding was from 0 to 2, and from 8 to 10, respectively. In accordance with expectations, the lowest values of solar intensity occurred at clouding 10, with low clouds (C_L) and medium-height clouds (C_M), while highest values were obtained with high clouds (C_H); this differentiation grew larger with increasing sun altitude. In this instance, the differentiation was highest at $h_0 \approx 40^{\circ}$, when the solar intensity with high clouds was almost 10 times greater than with low clouds. Under conditions of low sun altitudes ($h_0 < 20^{\circ}$), the differences between observations made a. m. and p. m. — differences caused by ground obstacles — were recorded separately for a. m., and separately for p. m. periods. Plotting on plane J, h_0 the mean values for measurements of insolation under a clear sky (clouding 0 to 2), under a sky half covered by clouds (clouding 4 to 6) and under a clouded sky (clouding 8 to 10), one obtains in all instances almost linear interdependences for $h_0 < 20^{\circ}$. In conformity with an increase in clouding, the directional coefficients of these quasi-straight lines grow successively smaller, amounting to:

with measurements made before zenith position:

$$\left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{0-2} = 900 \text{ lux}/_0, \quad \left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{4-6}^{\circ} = 700 \text{ lux}/_0, \quad \left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{4-6}^{\circ} = 700 \text{ lux}/_0,$$

$$\left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{8-10} = 500 \text{ lux}/_0$$

with measurements made after zenith position:

$$\left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{0-2} = 1000 \text{ lux}/_0, \quad \left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{4-6}^{\circ} = 800 \text{ lux}/_0, \quad \left(\frac{\Delta J}{\Delta h_0}\right)_{4-6}^{\bullet} = 800 \text{ lux}/_0,$$

$$\left(\frac{\Delta J}{\Delta h^{\circ}}\right)_{8-10} = 500 \text{ lux}/_0^1$$

These results were obtained from averaging some 400 measurements made a. m., and over 400 made p. m. For selected days the authors also analyzed the dependence of solar radiation on kind of clouds and solar altitude, and presented values of solar intensity during sunrise and sunset and during zenith position of the sun.

¹ The lower exponent indicates the amount of clouding, the upper — visibility of the sun through clouds: ○ — visible, ● — invisible.