◆◆◆◆ ORYGINALNE PRACE I PRZYCZYNKI ◆◆◆◆

Dorota MATUSZKO
Zakład Klimatologii UJ – Kraków

PORÓWNANIE WARTOŚCI USŁONECZNIENIA MIERZONEGO HELIOGRAFEM CAMPBELLA-STOKESA I CZUJNIKIEM ELEKTRONICZNYM CSD3

COMPARISON OF SUNSHINE DURATION MEASURED BY A CAMPBELL-STOKES HELIOGRAPH AND A CSD3 ELECTRONIC SENSOR

W ostatnich latach na stacjach meteorologicznych do pomiaru usłonecznienia coraz częściej używa się czujników elektronicznych, w miejsce stosowanych od końca XIX wieku heliografów Campbella-Stokesa. Zgodnie z klimatologiczną definicją jednorodności ciągu „zmiana instrumentów i metod pomiarowych należy do czynników pozameteorologicznych, które mogą mieć wpływ na błędną interpretację ciągu" (Niedźwiedź 2003). Jak podkreślają naukowcy (Kejna, Uscka-Kowalkowska, 2006; Kuśmierek, 2006; Lorenc, 2006), wykorzystanie wyników z czujników elektronicznych do badań klimatu powinno być poprzedzone analizą porównawczą tych odczytów z uzyskiwanymi przy użyciu metod tradycyjnych. Według instrukcji World Meteorological Organization – WMO (1983) wyniki pomiarów z nowych przyrządów należy weryfikować w dłuższym czasie (co najmniej przez jeden rok).

Celem niniejszego opracowania jest porównanie dobowych wartości usłonecznienia mierzonego heliografem Campbella-Stokesa i czujnikiem elektronicznym CSD3 oraz próba wyjaśnienia przyczyn różnic we wskazaniach obu przyrządów.

W pracy wykorzystano dane heliograficzne oraz wyniki obserwacji zachmurzenia z lat 2007-2011 pochodzące ze stacji Naukowej Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Przyrządy

do pomiaru usłonecznienia znajdują się na dachu budynku Collegium Śniadeckiego (dawne Obserwatorium Astronomiczne), w miejscu otwartym, w ciągu całego roku dostępnym dla promieni słonecznych.

Czujnik CSD3 zasadniczo różni się wyglądem i metodą pomiarową od heliografu Campbella-Stokesa (tab. 1). W tradycyjnym przyrządzie stosowana jest metoda bezpośrednia, optyczna, wykorzystująca do rejestracji energię cieplną promieniowania bezpośredniego Słońca. W czujniku elektronicznym natomiast stosuje się metodę pośrednią, różnicową, opartą na pomiarze różnicy promieniowania całkowitego i rozproszonego (Różdżyński, 1996). Według instrukcji CSD3 przyrząd ten składa się z trzech czujników promieniowania. Jeden z nich mierzy promieniowanie całkowite, a z dwóch pozostałych czujników (które „widzą" różne fragmenty nieboskłonu) jest wyliczane promieniowanie rozproszone. Na podstawie tych dwóch wartości jest obliczane promieniowanie bezpośrednie, a właściwie czas jego występowania, czyli usłonecznienie. Najważniejszą różnicą między tradycyjnym heliografem a czujnikiem CSD3 jest próg zadziałania przyrządu. Według M. Kuczmarskiego (1990) heliograf Campbella-Stokesa zaczyna notować usłonecznienie dopiero od momentu, w którym natężenie promieniowania słonecznego przekracza lub jest równe 279,2 Wm^{-2}, natomiast w czujnikach elektronicznych próg czułości jest ustawiony na 120 Wm^{-2}.

Tabela. 1. Porównanie budowy i zasady działania heliografu Campbella-Stokesa i czujnika CSD3
Table 1. Construction and operating information for the Campbell-Stokes heliograph and CSD3 sensor

	Heliograf Campbella-Stokesa	CSD3 Kipp&Zonen
Budowa Zasada działania		
Próg czułości	279,2 Wm^{-2}	120 Wm^{-2}
Zalety	Niezawodny, tani i łatwy w obsłudze, wieloletnia ciągłość pomiarów w Polsce i na świecie	Obiektywny pomiar, łatwa archiwizacja i przesyłanie wyników
Wady	Subiektywizm w interpretacji heliogramu, konieczny obserwator do zmiany paska, wady metodyczne (oszronienie kuli, różny kolor i grubość paska)	Przerwy w działaniu z powodu braku prądu, krótkie serie, jest na niewielu stacjach, nie przeprowadzono analizy porównawczej w IMGW

Dotychczasowy stan badań

W literaturze klimatologicznej brak jest publikacji dotyczących porównania wskazań heliografu Campbella-Stokesa i czujnika elektronicznego. Prace zagraniczne (Painter, 1981; Ikeda i in., 1986) i dokumenty WMO (1983) opisują budowę nowych przyrządów, ich zasadę działania, dokładność, kalibrację itp., lecz nie zawierają porównania wartości usłonecznienia z przyrządu tradycyjnego i automatycznego. W Polsce jedyna wzmianka na ten temat znajduje się w opracowaniu Kejny i Usckiej-Kowalkowskiej (2006). W publikacji tej porównano wyniki pomiarów meteorologicznych wykonywanych w 2002 r. metodą tradycyjną i automatyczną w Stacji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego UMK w Koniczynce. Oprócz analizy innych elementów meteorologicznych, przeprowadzono porównanie wyników rejestracji usłonecznienia za pomocą heliografu Campbella-Stokesa i czujnika DSU12. Stwierdzono znaczne różnice we wskazaniach obu przyrządów z powodu zbyt dużej czułości czujnika automatycznego. Suma roczna usłonecznienia mierzonego czujnikiem DSU12 była o 237,7 godziny większa od sumy uzyskanej metodą tradycyjną za pomocą pomiaru heliografem Campbella-Stokesa.

Problematyczny wzrost sum rocznych usłonecznienia jest widoczny również na kilku stacjach Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) w Polsce, na których jest użytkowany czujnik elektroniczny (tab. 2). Zdecydowanie wyróżniają się wartości usłonecznienia w Warszawie i Rzeszowie (od 2005 r.). Warto zauważyć, że w Warszawie, na podstawie danych z lat 1901-1990, w których używano heliografu Campbella-Stokesa, średnia roczna suma usłonecznienia wynosiła 1605 godzin, a najwyższa w wieloleciu – 1898 godzin (Podogrocki, 2002). Analiza rozkładu sum rocznych usłonecznienia w Polsce (*Atlas …*, 2005) pozwala stwierdzić, że najwyższe wartości usłonecznienia, przekraczające średnio 1650 godzin, występują na zachodnim wybrzeżu Bałtyku, w pasie środkowo-zachodnim oraz na Lubelszczyźnie. Rejon Warszawy nie wyróżnia się na tle wartości średnich usłonecznienia w Polsce. Nie ma zatem wątpliwości, że to zamiana tradycyjnego heliografu na nowy czujnik na stacji Warszawa–Okęcie (tab. 2) musiała doprowadzić do zawyżenia usłonecznienia o ok. 600 do 855 godzin rocznie, co wskazuje na ewidentne zerwanie jednorodności serii. Z dużą ostrożnością należy wykorzystywać też dane z Bielska-Białej (od września 2002 r.) oraz z Kętrzyna, Krosna, Kozienic, Siedlec, Wielunia, Koszalina, Jeleniej Góry, Kłodzka i Zielonej Góry (od 1 IX 2011), gdyż na tych stacjach usłonecznienie jest mierzone czujnikiem automatycznym bez przeprowadzenia wcześniejszej analizy porównawczej.

Tabela. 2. Sumy roczne usłonecznienia na wybranych stacjach IMGW w Polsce
Table 2. Annual sunshine duration totals at selected IMGW stations in Poland

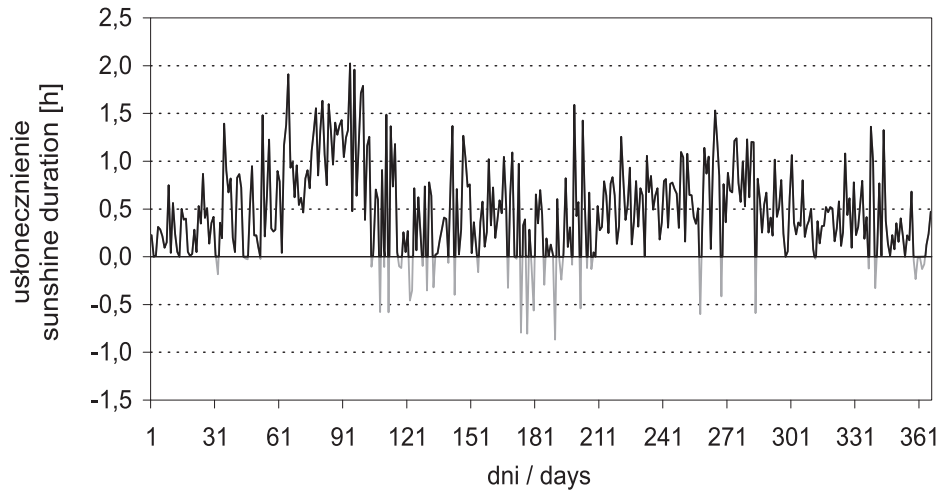
Stacje IMGW	Lata		
	2000	2005	2008
Warszawa-Okęcie	**2282**	**2460**	**2241**
Łódź	1695	1846	1798
Częstochowa	1667	1821	1749
Białystok	1856	1836	1678
Gorzów	1695	1885	1859
Rzeszów-Jasionka	1768	**2106**	**2083**
Nowy Sącz	1803	1646	1708
Zakopane	1601	1550	1483
Suwałki	1746	1810	1671
Łeba	1871	1952	1939

Dane IMGW na podstawie *Rocznika statystycznego GUS*, *www. stat.gov.pl/GUS*

Porównanie wartości usłonecznienia mierzonego przyrządem tradycyjnym i automatycznym

Na podstawie analizy przebiegu rocznego dziennych wartości usłonecznienia mierzonego w Krakowie heliografem Campbella-Stokesa i czujnikiem CSD3 w latach 2007-2011 można zauważyć podobne tendencje w przebiegu usłonecznienia, lecz zwykle czujnik elektroniczny pokazuje większe usłonecznienie niż heliograf (nawet o kilka godzin dziennie), szczególnie w dniach o maksymalnym dopływie promieniowania słonecznego (wiosna, lato). Jest to skutek dużej czułości przyrządu elektronicznego, który, w przeciwieństwie do tradycyjnego heliografu, przy chwilowym odkryciu przez chmury tarczy słonecznej rejestruje dopływ promieniowania bezpośredniego. Ponadto przy niskim położeniu Słońca czujnik elektroniczny szybciej niż heliograf reaguje na dopływ promieniowania słonecznego. Heliograf Campbella-Stokesa nie rejestruje usłonecznienia krótko po wschodzie i przed zachodem, gdy wysokość Słońca nad horyzontem jest mniejsza od 3-5^{o}, bo wtedy natężenie promieniowania słonecznego nie przekracza wartości progowej (279,2 Wm^{-2}), natomiast czujnik elektroniczny wysyła impuls znacznie wcześniej, bo już przy natężeniu 120 Wm^{-2}. Z tego powodu w dniach bezchmurnych ciepłej połowy roku wartości usłonecznienia rejestrowane przez CSD3 są o prawie 2 godziny większe niż notowane przez heliograf. W zimie, przy niskim położeniu Słońca i przeważającym zachmurzeniu warstwowym, heliograf Campbella-Stokesa często nie rejestruje usłonecznienia, natomiast CSD3 wysyła impuls

i dlatego także o tej porze roku usłonecznienie zmierzone przez czujnik elektroniczny jest większe niż z tradycyjnego heliografu (rys. 1).



Rys. 1. Przebieg różnicy średniego usłonecznienia mierzonego heliografem Campbella-Stokesa i czujnikiem elektronicznym CSD3 (Kraków, 2007-2011)

Fig. 1. Course of difference in sunshine duration data produced by the Campbell-Stokes heliograph and CSD3 sensor (Krakow, 2007-2011)

Zdarzają się jednak dni, w których CSD3 rejestruje mniejsze usłonecznienie (do godziny) niż tradycyjny heliograf (rys. 1). Sytuacje takie są możliwe wtedy, gdy występują szybko przesuwające się po niebie chmury *Cumulus*, które w krótkim czasie zakrywają i odsłaniają tarczę słoneczną. Wówczas na pasku heliografu jest wypalony ciągły ślad, z miejscowymi zwężeniami (średnio 0,9-1,0 h), a CSD3 rejestruje mniejsze usłonecznienie (0,6-0,8 h). Przy chmurach bardziej rozbudowanych (*Cumulus congestus*) różnica we wskazaniach przyrządów jest jeszcze większa. Także przy grubych chmurach warstwowych wyższych pięter (*Altostratus* i *Cirrostratus*), które powodują duże promieniowanie rozproszone, heliograf Campbella-Stokesa rejestruje usłonecznienie, a CSD3 go nie wskazuje z powodu małego promieniowania bezpośredniego. Ze względu na zasadę działania CSD3, im więcej jest promieniowania rozproszonego, tym mniejszy sygnał usłonecznienia pokazuje czujnik. Zasłonięcie tarczy słonecznej przez chmury *Altocumulus translucidus* powoduje rejestrację usłonecznienia przez CSD3 i cienki ślad na pasku heliografu, lecz wartości wskazywane przez obydwa przyrządy często są odmienne.

Największe różnice (dodatnie i ujemne) wartości usłonecznienia mierzonego heliografem Campbella-Stokesa i czujnikiem CSD3 występują przy chmurach różnych pięter (*Cirrus*, *Cirrocumulus*, *Cirrostratus*, *Altocumulus*, *Stratocumulus* i *Cumulus*), szczególnie na wiosnę (kwiecień, maj) i we wrześniu (tab. 3).

Tab. 3. Średnie dzienne różnice usłonecznienia [h] między wskazaniami czujnika CSD3 a heliografem Campbella-Stokesa (Kraków, 2007-2011)

Table 3. Mean daily differences in sunshine duration [h] for the CSD3 sensor and Campbell-Stokes heliograph (Krakow, 2007-2011)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	rok
0,3*	0,6	1,1	1,1	0,8	0,6	0,6	0,7	1,0	0,7	0,5	0,4	0,7

* Wartości bezwzględne

Rozpatrując przedziały godzinne usłonecznienia, można zauważyć, że największa zgodność we wskazaniach obu przyrządów jest w lecie, w południe przy niebie bezchmurnym lub z chmurami *Cirrus* i cienkimi *Cirrostratus* i *Cirrocumulus*.

Przy całkowitym zachmurzeniu warstwowym (*Altostratus*, *Stratocumulus* lub *Stratus* odmiany *opacus*) żaden przyrząd nie rejestruje usłonecznienia.

W Krakowie w analizowanych latach sumy roczne usłonecznienia określone na podstawie CSD3 były o ok. 200-300 godzin większe niż zmierzone za pomocą heliografu.

Wnioski

– Zastąpienie tradycyjnych heliografów czujnikami elektronicznymi bez przeprowadzenia badań porównawczych może sugerować wzrost usłonecznienia i prowadzić do błędnej interpretacji wyników w analizach czasowych i przestrzennych.

– Stwierdzone różnice między wartościami usłonecznienia mierzonego za pomocą heliografu i CSD3 wynikają z odmiennych metod pomiaru i dlatego wartości te są trudne do porównania i wyjaśnienia.

– Ponad dwukrotnie niższy próg czułości CSD3 niż heliografu powoduje szybszą reakcję czujnika elektronicznego na dopływ promieniowania słonecznego, szczególnie kilkadziesiąt minut po wschodzie i przed zachodem Słońca oraz przy chwilowym odsłonięciu tarczy słonecznej przez chmury, gdy występuje duże zachmurzenie.

– Różnice wartości usłonecznienia (dodatnie i ujemne) zależą od wielkości i rodzaju zachmurzenia zakrywającego tarczę słoneczną, a nie od zachmurzenia ogólnego; dlatego nie wystarczą standardowe obserwacje zachmurzenia, tylko w 3 terminach klimatologicznych.

– Heliograf Campbella-Stokesa, mimo pewnych niedoskonałości przy rejestracji usłonecznienia i interpretacji heliogramów, pozostaje nadal najlepszym przyrządem do pomiaru usłonecznienia, pozwalającym na analizę wieloletnich ciągów heliograficznych.

– Uzyskane wyniki badań wskazują na konieczność ich kontynuacji w celu wyliczenia współczynników korygujących serie danych heliograficznych.

Podziękowania

Autorka składa podziękowania Panu mgr Jakubowi Soroce ze Stacji Hydrometeorologicznej IMGW w Gorzowie Wlkp. za cenne spostrzeżenia i uwagi w czasie przygotowywania artykułu.

Materiały wpłynęły do redakcji 15 I 2012.

Literatura

Atlas klimatu Polski, 2005, red. Lorenc H., IMGW, Warszawa, s. 21 i 23.

Ikeda K., Aoshima T., Miyake Y., 1986, *Development of a new sunshine-duration meter*. J. of the Met. Soc. of Japan, 64, 6, 987-993.

Kejna M., Uscka-Kowalkowska J., 2006, *Porównanie wyników pomiarów meteorologicznych w Stacji ZMŚP w Koniczynce (Pojezierze Chełmińskie) wykonanych metodą tradycyjną i automatyczną w roku hydrologicznym 2002*. Annales UMCS, Sec. B., 61, 24, 208-217.

Kuczmarski M., 1990, *Usłonecznienie Polski i jego przydatność dla helioterapii*. Dok. Geogr., 4, 67.

Kuśmierek R., 2006, *Porównanie wyników pomiarów promieniowania całkowitego metodą pośrednią i automatyczną*. Annales UMCS, Sec. B., 61, 24, 250-255.

Lorenc H. 2006, *Ocena jakości danych meteorologicznych po wprowadzeniu automatycznych przyrządów rejestrujących na sieci IMGW*. Annales UMCS, Sec. B., 61, 24, 256-266.

Painter H.E., 1981, *The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance*. The Meteorological Magazine, 110, 102-109.

Podogrocki J., 2002, *Z badań usłonecznienia w Warszawie*. [w:] *Działalność naukowa profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja*. Materiały Sympozjum Klimatologicznego na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń 16-17 IX 1993,147-152.

Różdżyński K., 1996, *Miernictwo meteorologiczne*, t. 2, IMGW, Warszawa.

Słownik meteorologiczny, 2003, red. Niedźwiedź T., PTGeof., IMGW, Warszawa.

WMO, 1983, *Guide to Climatological Practices*. Geneva.

Streszczenie

W ostatnich latach do pomiaru usłonecznienia coraz częściej używa się czujników elektronicznych w miejsce stosowanych od końca XIX wieku heliografów Campbella-Stokesa. Według instrukcji WMO (1983) wyniki pomiarów z nowych przyrządów należy weryfikować w dłuższym okresie (co najmniej przez jeden rok).

Celem niniejszego opracowania jest porównanie dobowych wartości usłonecznienia mierzonego heliografem Campbella-Stokesa i czujnikiem elektronicznym CSD3 oraz próba wyjaśnienia różnic we wskazaniach obu przyrządów. W pracy wykorzystano dane heliograficzne oraz wyniki obserwacji zachmurzenia z lat 2007-2011 pochodzące ze stacji IGiGP UJ.

W wyniku przeprowadzonego porównania stwierdzono podobne tendencje w przebiegu usłonecznienia, lecz zwykle czujnik elektroniczny pokazuje większe usłonecznienie niż heliograf. Ponad

dwukrotnie niższy próg czułości CSD3 niż heliografu powoduje szybszą reakcję czujnika na dopływ promieniowania słonecznego, szczególnie kilkadziesiąt minut po wschodzie i przed zachodem Słońca oraz przy chwilowym odsłonięciu tarczy słonecznej przez chmury. Zdarzają się jednak dni, w których CSD3 rejestruje mniejsze usłonecznienie niż tradycyjny heliograf. Sytuacje takie są możliwe wtedy, gdy występują chmury *Cumulus*, które bardzo szybko przechodzą przez tarczę słoneczną. CSD3 nie wskazuje usłonecznienia przy grubych chmurach *Altostratus* i *Cirrostratus* z powodu małego promieniowania bezpośredniego, natomiast heliograf rejestruje usłonecznienie.

Słowa kluczowe: usłonecznienie, heliograf Campbella-Stokesa, czujnik elektroniczny CSD3

Summary

In recent years electronic sensors have often replaced Campbell-Stokes heliographs in the measurement of sunshine duration. The WMO (1983) recommends that measurements produced by new instruments should be verified over a longer period – at least a year.

The purpose of this paper is to compare daily sunshine duration data measured using a Campbell-Stokes heliograph and a CSD3 electronic sensor as well as to attempt to explain discrepancies between the two data sets.

The paper is based on heliographic data and cloudiness observations for 2007-2011. All the data come from the Research Station of the Department of Climatology at the Jagiellonian Institute of Geography and Spatial Management.

Both instruments tend to produce similar sunshine duration data, however, the electronic sensor tends to show more sunshine duration than the heliograph. The difference may amount to several hours a day, especially on days with maximum solar radiation. The CSD3 sensor is twice as sensitive as the heliograph and quickly reacts to solar radiation. This is especially true for the first hour following sunrise, the last hour before sunset and when the Sun's disk becomes visible for short periods of time due to changes in cloudiness. However, there are days when the CSD3 registers less sunshine duration (up to an hour) than the heliograph. This happens with *Cumulus* clouds in the sky, which tend to pass the Sun's disk very quickly. The CSD3 sensor does not register sunshine in the presence of thick *Altostratus* and *Cirrostratus* clouds due to the relative lack of direct radiation. The heliograph, on the other hand, registers this low level of sunshine.

Key words: sunshine duration, Campbell-Stokes heliograph, CSD3 electronic sensor

Dorota Matuszko
d.matuszko@uj.edu.pl
Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Uniwersytet Jagielloński