

Dorota MATUSZKO, Katarzyna PIOTROWICZ
Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej*

ZWIĄZEK USŁONECZNIEŃ I TEMPERATURY POWIETRZA NA PODSTAWIE WIELOLETNIEJ SERII KLIMATOLOGICZNEJ W KRAKOWIE (1884-2016)

RELATIONSHIP BETWEEN SUNSHINE DURATION AND AIR TEMPERATURE ON THE BASIS OF LONG-TERM CLIMATOLOGICAL SERIES IN KRAKOW (1884-2016)

Wstęp

Słońce jest podstawowym źródłem ciepła na Ziemi, a usłonecznienie jest najbardziej rozpowszechnioną i najdłuższą na świecie mierzoną charakterystyką promieniowania słonecznego. Powierzchnia ziemi, nagrzana w wyniku pochłaniania promieniowania słonecznego, staje się źródłem promieniowania długofalowego ogrzewającego atmosferę. Między promieniowaniem słonecznym a temperaturą powietrza zachodzą nie do końca poznane sprzężenia zwrotne. Kraków należy do nielicznych miast w Europie, w którym pomiary usłonecznienia i temperatury powietrza wykonywane są w tym samym miejscu w całym okresie pomiarowym (Matuszko 2007).

Celem opracowania jest charakterystyka zmienności usłonecznienia i temperatury powietrza oraz określenie związku między nimi. Analiza wieloletniego i rocznego przebiegu tych elementów klimatu, na podstawie jednej z najdłuższych w Europie serii klimatologicznych, może pomóc w zrozumieniu mechanizmu współczesnego ocieplenia. W literaturze klimatologicznej niewiele prac poświęcono temu zagadnieniu, prawdopodobnie z powodu braku jednorodnych i jednoczesnych serii danych. Większość stacji europejskich ma znacznie krótsze niż Kraków serie pomiarowe, co powoduje, że inne publikacje oparte są głównie na ciągach danych o usłonecznieniu i temperaturze powietrza od połowy XX w.

*Zakład Klimatologii

Materiały źródłowe i metody opracowania

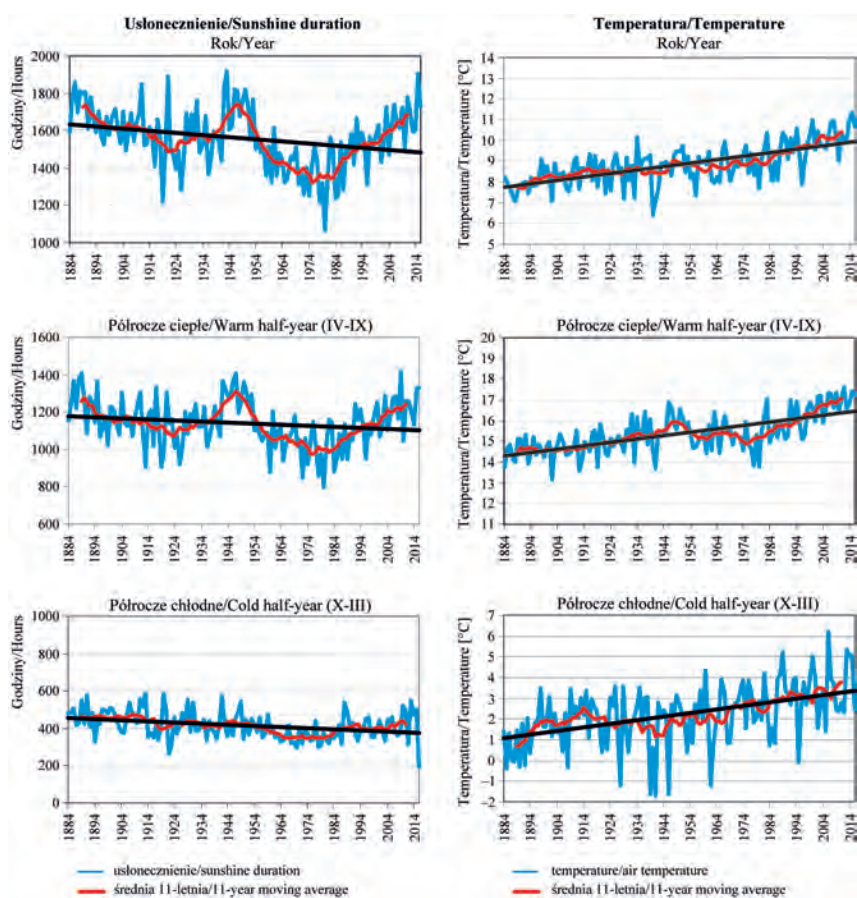
W opracowaniu wykorzystano wyniki pomiarów wykonywanych na stacji meteorologicznej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie w latach 1884-2016: średnie dobowe wartości temperatury powietrza z klatki meteorologicznej umieszczonej na ścianie budynku o ekspozycji NNW (18 m n.p.g.) i sumy dzienne usłonecznienia z heliografu Campbella-Stokesa zainstalowanego na dachu tego budynku (20 m n.p.g.).

Lokalizacja przyrządów nie uległa zmianie od początku pomiarów do dziś. Wcześniej stacja meteorologiczna należała do Obserwatorium Astronomicznego UJ, a od roku 1976 jest własnością Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ (Matuszko 2007). W ciągu całej serii pomiarów heliograf wymieniany był tylko raz, przy czym przez 353 dni oba przyrządy działały równocześnie. Uzyskane w ten sposób wyniki posłużyły do porównania heliografów i ujednolicenia serii. Wykonane testy statystyczne szeregu usłonecznienia i temperatury powietrza nie wykazały zerwania jednorodności (Lewik i in. 2010).

Wieloletnią zmienność i tendencje zmian analizowanych elementów badano wykorzystując m.in. równania prostej regresji (trend liniowy) oraz współczynnik korelacji rang Spearmana. Dodatkowo posłużono się wykresem (pętlą) histerezy w celu przedstawienia współzależności usłonecznienia i temperatury powietrza w przebiegu rocznym.

Wieloletnia zmienność i tendencje zmian usłonecznienia i temperatury powietrza

Średnia roczna suma usłonecznienia w Krakowie z lat 1884-2016 wynosiła 1559,3 godzin, natomiast maksymalna – 1919,5 (w 1943 r.), a minimalna – 1067,2 (w 1980 r.) (rys. 1). Początek analizowanego okresu (lata 1884-1900) charakteryzował się wysokimi sumami usłonecznienia (powyżej 1600 godzin). W kolejnych latach sumy roczne usłonecznienia utrzymywały się na poziomie około 1500 godzin, z wyjątkiem roku 1921, kiedy wynosiły 1892,4 godziny i roku 1919, kiedy osiągnęły zaledwie 1221,9 godzin (rys. 1). W latach 40. XX w. (1942-1943, 1946-1947 i 1950) usłonecznienie ponownie wzrosło, przekraczając 1800 godzin. Od roku 1951 sumy roczne ponownie się obniżyły, osiągając minimum w 1980 r. W kolejnych latach, aż do końca badanego okresu, usłonecznienie nieregularnie wzrastało, szczególnie wyraźnie w latach 1981-1995 oraz w pierwszej dekadzie XXI w. Od 2006 r. analizowane wartości przekraczały 1600 godzin, a w latach 2006, 2009, 2011-2012, 2015-2016 – 1700 godzin. Wyjątkiem był rok 2010 z sumą usłonecznienia wynoszącą tylko 1499,6 godzin, czego przyczyną mógł być wybuch wulkanu Eyjafjallajökull na Islandii w kwietniu tego samego



Rys. 1. Sumy usłonecznienia i średnia temperatura powietrza w Krakowie w latach 1884-2016

Fig. 1. Sunshine duration and mean air temperature in Krakow in the period 1884-2016

roku. Unoszące się w powietrzu aerozole wulkaniczne mogły bezpośrednio, jak i pośrednio, poprzez wzrost zachmurzenia, przyczynić się do ograniczenia dopływu promieniowania słonecznego. Wybuchem wulkanu (Mount St. Helens w maju 1980 r.) tłumaczy się także minimum rocznego usłonecznienia w 1980 r. w Krakowie i innych polskich miastach (Matuszko 2014). Związek między erupcją wulkanów a usłonecznieniem badali m.in. Stanhill i Cohen (2005).

Wzrosty i spadki rocznych sum usłonecznienia w badanym wieloleciu były skutkiem przede wszystkim zmian w półroczu ciepłym (IV-IX) (rys. 1). Sumy usłonecznienia w półroczu zimowym (X-III) były bardziej wyrównane i wahały się od 193,7 godzin w 2016 r. do 585,6 godzin w 1920 r., przy średniej wieloletniej wynoszącej 415,7 godzin. Całość serii wykazuje spadek liniowy, istotny sta-

tystycznie na poziomie 0,05 w przypadku sum rocznych oraz stycznia, lutego i września (tab. 1).

Średnia roczna temperatura powietrza w analizowanym wieloleciu wynosiła w Krakowie 8,8°C i wahała się od 6,4°C w 1940 r. do 11,3°C w 2015 r. (rys. 1). Z końcem lat 80. XX w. zdecydowanie więcej było lat, w których średnia roczna temperatura przekroczyła 10°C. W całym badanym okresie było ich bowiem osiemnaście, a od 1989 r. aż szesnaście, z czego w 2000, 2008, 2014 i 2015 r. średnia roczna temperatura była równa lub wyższa od 11,0°C. Na tle wyraźnie zaznaczającego się rosnącego trendu temperatury powietrza występują także okresy chłodniejsze, m.in. przełom lat 30. i 40. i lata 70. XX w. w półroczu ciepłym. Od początku XXI w. notowane są najwyższe średnie temperatury powietrza w historii pomiarów w Krakowie, zarówno roczne, jak i w półroczu ciepłym oraz chłodnym (rys. 1).

W Krakowie wzrost temperatury zaznaczył się w każdym miesiącu i w obu półroczach (tab. 1, rys. 1), przy czym największy był w styczniu, kwietniu i sierpniu (2,1°C na 100 lat), a najmniejszy we wrześniu i październiku (1,0°C na 100 lat).

Tabela 1. Trendy liniowe zmian usłonecznienia i temperatury powietrza w Krakowie w latach 1884-2016

Table 1. Linear trends of sunshine duration and air temperature changes in Krakow in the period 1884-2016

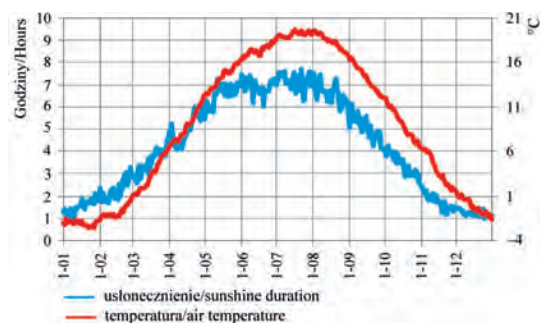
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok Year
Usłonecznienie [godz.] Sunshine duration [hours]													
Trend/100 lat Trend/100 years	-12,7	-15,0	-15,1	-2,9	-11,1	-8,0	-3,1	-0,7	-29,9	-4,7	-7,5	-0,8	-111,4
<i>r</i>	-0,27	-0,24	-0,16	-0,03	-0,08	-0,04	-0,06	-0,02	-0,31	-0,03	-0,16	-0,07	-0,26
Temperatura powietrza [°C] Air temperature [°C]													
Trend/100 lat Trend/100 years	2,1	2,0	1,5	2,1	1,4	1,6	1,7	2,1	1,0	1,0	1,9	1,7	1,7
<i>r</i>	0,24	0,24	0,26	0,46	0,35	0,44	0,41	0,57	0,23	0,23	0,36	0,28	0,65

r – współczynnik korelacji rang Spearmana, bold – wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05 ($p < 0,05$)

r – Spearman's rank correlation coefficient, bold – significant coefficients at the 0.05 level

Przebieg roczny usłonecznienia (rys. 2), mimo dużej, codziennej zmienności, nawiązuje do rocznego przebiegu kulminacji Słońca nad horyzontem i długości trwania dnia w Krakowie. Świadczy to o decydującej roli czynników astronomicznych w kształtowaniu wielkości usłonecznienia. Jako przyczynę meteorologiczną można uznać niewielki spadek usłonecznienia występujący w połowie czerwca w Krakowie, jak również w innych polskich miastach (Degirmendzić 2004). Powodem tego jest wzrost zachmurzenia związany z przebudową układu cyrkulacji w Europie i nasileniem adwekcji powietrza z zachodu i północnego zachodu (Kaszewski 1983). Wraz ze zmniejszeniem się długości dnia usłonecznienie spada do najmniejszych wartości w grudniu, choć już w listopadzie Słońce świeci średnio niewiele ponad godzinę dziennie. Od stycznia usłonecznienie stopniowo wzrasta z niewielkimi wahaniami w połowie kwietnia i maja (rys. 2). W rozkładzie rocznym zaznacza się charakterystyczne spłaszczenie krzywej średniego dziennego usłonecznienia w okresie letnim, począwszy od trzeciej dekady maja do drugiej dekady sierpnia, z wyraźnym zmniejszeniem usłonecznienia w drugiej dekadzie czerwca i lipca (rys. 2). W Krakowie najlepsze warunki usłonecznienia panują przeciętnie w pierwszej dekadzie czerwca i lipca oraz na przełomie lipca i sierpnia, natomiast najgorsze od drugiej dekady grudnia do pierwszej stycznia.

Z analizy przebiegu rocznego średnich dobowych wartości temperatury powietrza (rys. 2) wynika, że najchłodniejszy w Krakowie jest najczęściej okres od drugiej dekady stycznia do początku lutego. Wzrost temperatury powyżej $0,0^{\circ}\text{C}$ następuje około 25 lutego. Kolejne wartości progowe wieloletnia średnia dobową temperaturę powietrza osiąga 25 marca ($5,0^{\circ}\text{C}$), 23 kwietnia ($10,0^{\circ}\text{C}$) oraz 18 i 24 maja ($15,0^{\circ}\text{C}$). Najcieplejsza w roku jest najczęściej druga połowa lipca i pierwsza dekada sierpnia. Po tym okresie wartości temperatury stopniowo spadają przekraczając kolejne wartości progowe w dniach 11 września ($15,0^{\circ}\text{C}$), 11 października ($10,0^{\circ}\text{C}$), 9 listopada ($5,0^{\circ}\text{C}$) i 13 grudnia ($0,0^{\circ}\text{C}$).



Rys. 2. Przebieg roczny usłonecznienia i temperatury powietrza w Krakowie w latach 1884-2016

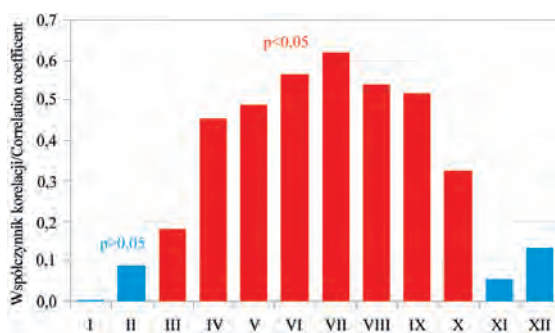
Fig. 2. Annual course of sunshine duration and air temperature in Krakow in the period 1884-2016

Związek usłonecznienia z temperaturą powietrza

Analiza wartości współczynnika korelacji rang Spearmana pomiędzy miesięcznymi sumami usłonecznienia i średnimi temperaturami powietrza wskazuje na istotną statystycznie zależność na poziomie 0,05 od marca do października ($p < 0,05$; rys. 3). Najwyższe wartości współczynniki korelacji osiągnęły w lipcu i czerwcu, odpowiednio 0,61 i 0,56. Wyraźny związek usłonecznienia z temperaturą powietrza w półroczu ciepłym oznacza, że w tej części roku większy wpływ na temperaturę powietrza ma czynnik radiacyjny niż cyrkulacja atmosfery.

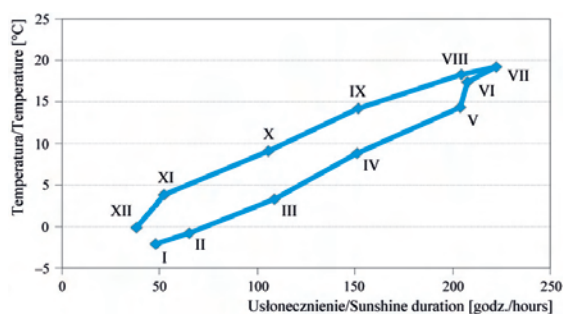
Pętla histerezy przedstawiona na rys. 4 wynika z cykliczności rocznej usłonecznienia i temperatury oraz przesunięcia w czasie ich maksimów. Widać wyraźnie, że przy zbliżonych wartościach usłonecznienia wiosną i jesienią, np. w marcu i październiku, kwietniu i wrześniu oraz maju i sierpniu, temperatura powietrza jest o kilka stopni wyższa w lecie i w jesieni niż na wiosnę, co związane jest z bezwładnością cieplną systemu klimatycznego. Temperatura kolejnych dni zimy i wiosny jest skorelowana (szczególnie dotyczy to okresu od początku lutego do końca marca), co oznacza, że zarówno dodatnie, jak i ujemne anomalie termiczne mają skłonność do przenoszenia się z dnia na dzień. Jedną z fizycznych przyczyn tej prawidłowości jest sprzężenie zwrotne temperatury powietrza, pokrywy śnieżnej i bilansu cieplnego podłoża, zależnego od albedo, ciepła topnienia śniegu, a także stratyfikacji termicznej wpływającej na pionową wymianę ciepła (Matuszko, Węglarczyk 2015).

W lecie związek usłonecznienia i temperatury powietrza jest mniej skomplikowany, gdyż nagrzana w dzień powierzchnia czynna akumuluje ciepło i oddaje je z niewielkim opóźnieniem atmosferze. Pewne zakłócenia tej relacji



Rys. 3. Współczynnik korelacji między miesięcznymi wartościami usłonecznienia i temperatury powietrza w Krakowie w latach 1884-2016 ($p < 0,05$ – wartości istotne statystycznie na poziomie 0,05)

Fig. 3. Correlation coefficient between monthly sunshine duration and air temperature in Krakow in the period 1884-2016 ($p < 0.05$ – significant coefficients at the 0.05 level)



Rys. 4. Krzywa histerezy między miesięcznymi wartościami usłonecznienia i temperatury powietrza w Krakowie w latach 1884-2016

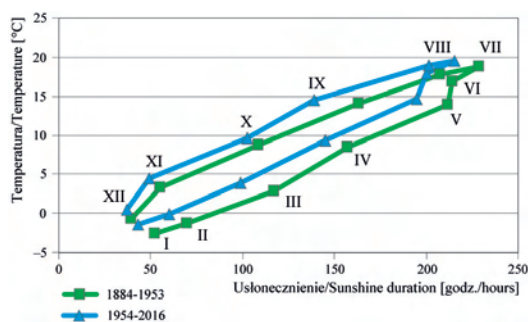
Fig. 4. Hysteresis loops between monthly sunshine duration and air temperature in Krakow in the period 1884-2016

może powodować zachmurzenie. Charakterystyczne dla cieplej części roku chmury konwekcyjne umożliwiając w dzień dopływ promieniowania słonecznego, natomiast w nocy, gdy ustaje konwekcja, często przekształcają się w *Stratocumulus* lub *Alto cumulus* zapobiegając ucieczce ciepła (Matuszko 2009). Wzrost temperatury powietrza powoduje wzrost częstości występowania chmur konwekcyjnych, co przyczynia się do dalszego zwiększenia temperatury zarówno w dzień, jak i w nocy. W lipcu największym w roku wartościom temperatury odpowiadają wysokie wartości usłonecznienia, natomiast w czerwcu, mimo bardziej korzystnych warunków astronomicznych, zarówno usłonecznienie, jak i temperatura powietrza przyjmują niższe wartości niż w lipcu (rys. 4). Dzieje się tak, gdyż pod koniec czerwca, gdy w Polsce są najdłuższe dni w roku, którym powinny towarzyszyć największe dobowe sumy usłonecznienia, występuje duże zachmurzenie warstwowe. Jest ono związane ze zmianami cyrkulacji o tej porze roku w Europie środkowej i nasileniem adwekcji powietrza z północy, sprzyjającej spiętrzeniu powietrza na stokach Karpat i powstawaniu chmur *Nimbostratus* (Matuszko 2009). Są to chmury o dużej miąższości, znacznie silniej odbijające promieniowanie krótkofalowe niż zatrzymujące długofalowe (Norris, Slingo 2009), czym przyczyniają się do spadku usłonecznienia i obniżenia temperatury powietrza.

Na rysunku 5 przedstawiono pętle histerezy dla dwóch okresów pomiarowych: 1884-1953 i 1954-2016. Jako moment przełomu wybrano lata 1953-1954 ze względu na zmianę cyrkulacji atmosfery oraz wzrost koncentracji zanieczyszczeń powietrza nad Krakowem w tym czasie (Lewik i in. 2010). Nastąpiło wówczas osłabienie cyrkulacji strefowej zachodniej, nasilenie cyrkulacji wschodniej, wzrost częstości występowania niżów i zwiększenie stopnia zachmurzenia, głównie warstwowego (Lewik i in. 2010). Równocześnie w 1954 r. na terenie Krakowa rozpoczęła działalność Huta in. Lenina (obecnie ArcelorMittal Poland), co spowodowało szybki wzrost emisji pyłów i gazów

przemysłowych oraz komunalnych i komunikacyjnych. Emisja zanieczyszczeń zmniejszała się dopiero pod koniec lat 80. XX w. na skutek spadku produkcji i wprowadzenia działań poprawiających stan czystości powietrza. Podział serii na dwa okresy ma również swoje uzasadnienie w przebiegu wieloletnim usłonecznienia (rys. 1). Około połowy lat 50. XX w. nastąpił wyraźny spadek usłonecznienia, widoczny zarówno w sumach rocznych, jak i sumach miesięcznych półroczia ciepłego. W przebiegu temperatury powietrza rok 1954 nie wyróżnia się znacząco, jednak lata 1884-1953 były chłodniejsze od następnego wielolecia. Średnia roczna temperatura wynosiła $8,4^{\circ}\text{C}$ i była niższa o $0,9^{\circ}\text{C}$ od średniej z lat 1954-2016. W półroczu ciepłym (IV-IX) różnica pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza z obu okresów wynosiła $0,8^{\circ}\text{C}$ (odpowiednio $18,0$ i $18,8^{\circ}\text{C}$), natomiast w półroczu chłodnym (X-III) – $1,1^{\circ}\text{C}$ (odpowiednio $1,7$ i $2,8^{\circ}\text{C}$).

W opracowaniu przyjęto, że pierwszy okres (1884-1953) reprezentuje naturalne warunki Krakowa, z małą urbanizacją i uprzemysłowieniem, natomiast drugi (1954-2016) oddaje warunki termiczne i nefologiczne miasta znajdującego się pod silnym wpływem czynników antropogenicznych, rozwiniętego pod względem demograficznym, terytorialnym i przemysłowym. Porównanie zależności usłonecznienia i temperatury w tych okresach wykazuje przesunięcie usłonecznienia w stronę niższych, a temperatury w kierunku wyższych wartości w latach 1954-2016 (rys. 5). W każdym miesiącu zmniejszyło się usłonecznienie, a wzrosła temperatura. Oznacza to, że od drugiej połowy XX w. nastąpiły większe przyrosty dobowej temperatury powietrza w stosunku do odpowiadających im zmian sum dobowych usłonecznienia. Można zatem sądzić, że współczesne ocieplenie związane jest z innymi czynnikami niż zmiany w dopływie energii słonecznej. Prawdopodobnie kluczową rolę odgrywają gazy cieplarniane, w tym przede wszystkim para wodna i związane z nią zachmurzenie oraz zanieczyszczenie gazowe i pyłowe ograniczające dopływ promieniowa-



Rys. 5. Krzywa histerezy między miesięcznymi wartościami usłonecznienia i temperatury powietrza w Krakowie w latach 1884-1953 i 1954-2016

Fig. 5. Hysteresis loops between monthly sunshine duration and air temperature in Krakow in the period 1884-1953 and 1954-2016

nia. Wzrost temperatury uruchamia szereg sprzężeń zwrotnych polegających na wzroście parowania, kondensacji pary wodnej i tworzeniu się chmur konwekcyjnych, przy powstawaniu których wydzielane jest do atmosfery ciepło utajone. Jak wynika z przeprowadzonych badań największy wzrost temperatury nastąpił w miesiącach chłodnej połowy roku, podczas gdy właśnie w styczniu i lutym występuje istotny statystycznie spadek usłonecznienia (tab. 1).

Największym spadkiem usłonecznienia (29,9 godz. na 100 lat) i najmniejszym wzrostem temperatury powietrza (1,0°C na 100 lat) odznacza się wrzesień. Miesiąc ten nie należy jeszcze do sezonu grzewczego w Krakowie, zatem zauważoną prawidłowość można wyjaśnić bardziej czynnikami cyrkulacyjnymi niż antropogenicznymi. Badania przeprowadzone przez Matuszko i Węglarczyka (2015) wskazują, że we wrześniu występowała największa w roku częstość sytuacji antycyklonalnych, najmniejsze w roku zachmurzenie oraz największa liczba dni bezchmurnych. Jednak w XX w. obserwuje się w tym miesiącu największy spadek ciśnienia atmosferycznego, a w pierwszej dekadzie XXI w. wzrost sytuacji cyklonalnych i zwiększenie zachmurzenia. Świadczy o tym największy spośród wszystkich miesięcy dodatni współczynnik trendu w przebiegu tego elementu meteorologicznego.

Omówienie wyników

Stwierdzony w Krakowie w latach 1951-1980 spadek usłonecznienia, a następnie jego wzrost, wystąpił na znacznym obszarze Europy, m.in.: w Czechach (Bednar 1990), Słowacji (Horecka 1990), Niemczech (Weber 1990), Austrii (Dobesch 1992), Hiszpanii (Liepert 2002; Sanchez-Lorenzo i in. 2007), Europie centralnej i południowo-wschodniej (Brázdil i in. 1994), w wielu miejscach Europy (Norris, Wild 2007; Matuszko 2016), Europie zachodniej (Sanchez-Lorenzo i in. 2008), Grecji (Kitsara i in. 2012) oraz w miastach Polski, m.in. Lublinie, Łodzi, Poznaniu czy Wrocławiu (Matuszko 2014). Wymienieni autorzy zwracają uwagę, że podobne tendencje wieloletnich zmian usłonecznienia – zmniejszenie liczby godzin ze słońcem w latach 50. do 80. XX w., a następnie wzrost w ostatnich dwóch dekadach XX w., na tak dużym obszarze świadczy o makroskalowych uwarunkowaniach dopływu promieniowania słonecznego, modyfikowanych jedynie czynnikami lokalnymi. Według Sanchez-Lorenzo i in. (2008) okres małego usłonecznienia związany jest z dużym zachmurzeniem towarzyszącym układom niskiego ciśnienia w latach 1960-1980, natomiast spadek zachmurzenia spowodowany jest przewagą układów wyżowych w ostatnich dwóch dekadach XX w. Badania Matuszko i Węglarczyka (2014) na podstawie danych z Krakowa potwierdzają powyższe wyniki i dodatkowo zwracają uwagę, że wzrost temperatury powietrza związany jest bardziej ze zmianą struktury zachmurzenia niż zmianami w stopniu

zachmurzenia, a relacja między tymi elementami jest bardziej widoczna w drugiej połowie XX w., gdy ocieplenie klimatu uległo przyspieszeniu. W Krakowie i innych regionach świata, szczególnie w ostatnim czterdziestoleciu, obserwuje się wzrost częstości występowania chmur o budowie pionowej, spadek częstości pojawiania się chmur warstwowych oraz częstsze tworzenie się chmur piętra wysokiego (Sun, Groisman 2000; Matuszko 2003; Wibig 2008).

Zdaniem innych autorów (m.in. Liepert 2002; Norris, Wild 2007; Warren i in. 2007; Ruckstuhl, Norris 2009; Lewik i in. 2010; Matuszko 2014) obok zmian cyrkulacyjnych duży wpływ na usłonecznienie może mieć też stan zanieczyszczenia atmosfery na terenach zurbanizowanych. W połowie lat 50. w wielu uprzemysłowionych miastach zaobserwowano wzrost zanieczyszczeń spowodowany intensywnym rozwojem przemysłu. Emitowane do atmosfery duże ilości aerozoli i sadzy zwiększały pochłanianie i odbijanie promieniowania słonecznego i zarazem powodowały powstawanie chmur, przyczyniając się do tzw. „globalnego zaciemnienia” (ang. *global dimming*). Koniec lat 70. to okres wzmożonych przedsięwzięć międzynarodowych, mających na celu zmniejszenie emisji związków siarki i azotu do atmosfery. Podjęte działania przyniosły pozytywne skutki, o czym świadczą publikowane przez różnych autorów (Ohvri i in. 2006) przebiegi wieloletniej zmienności przezroczystości atmosfery. „Globalne rozjaśnienie” (ang. *global brightening*) było szczególnie wyraźne w krajach Europy środkowo-wschodniej, gdzie po upadku przemysłu ciężkiego (początek lat 90. XX w.) zanieczyszczenie atmosfery znacznie się zmniejszyło (Matuszko 2014).

Wieloletni przebieg temperatury powietrza w Krakowie (rys. 1) potwierdza wyniki otrzymane w innych miejscach na świecie (Klein Tank, Können 2003; Beniston, Stephenson 2004; Moberg, Jones 2005; Brohan i in. 2006; IPCC 2013) i wskazuje na wzrastające ocieplenie klimatu. Zdaniem wielu naukowców (IPCC 2013) wzrost temperatury od lat 50. XX w. nie miał precedensu w skali poprzednich dziesięcioleci. W latach 1983-2012 temperatura na półkuli północnej miała wyższe wartości niż w poprzednich trzech dekadach i równocześnie było to najcieplejsze 30-lecie w ostatnich 1400 latach (IPCC 2013). Trend liniowy temperatury powietrza na Ziemi z lat 1880-2012 wyniósł $0,85 \pm 0,2^\circ\text{C}$. W piątym raporcie IPCC (2013) z wysokim poziomem wiarygodności stwierdzono również, że zmiany strumienia promieniowania słonecznego (irradiacji) nie miały wpływu na wzrost średniej globalnej temperatury powierzchni Ziemi w latach 1986-2008.

Brázdil i in. (1994), powołując się na pracę Lough i in. (1983), zwrócili uwagę na związek wieloletnich zmian usłonecznienia z temperaturą powietrza. Na podstawie danych z jedenastu stacji (Ateny, Bukareszt, Kraków, Hurbanovo, Karlsruhe, Klagenfurt, Poczdam, Śnieżka, Sonnblick, Wiedeń, Zagrzeb) analizowali usłonecznienie w kontekście globalnego ocieplenia w dwóch okresach: chłodnym (lata 1901-1920) i ciepłym (lata 1934-1953). Wyniki ich badań

potwierdziły wspólną tendencję zmian: po maksimum usłonecznienia w latach 40. XX w. nastąpił wyraźny spadek trwający do lat 80. Dużym sumom usłonecznienia towarzyszyła wysoka temperatura. W latach „ciepłych” zmienność usłonecznienia była większa na wiosnę i w zimie, a mniejsza w lecie i na jesieni. Potwierdzają to także wyniki badań Miki (1990), który podaje, że na Węgrzech dla wzrostu temperatury o 0,5 K, nastąpił wzrost usłonecznienia o 20%.

Wnioski

Na podstawie analizy zmienności temperatury powietrza i usłonecznienia w Krakowie, w latach 1884-2016, stwierdzono następujące wnioski:

1. przebieg wieloletni tych dwóch elementów jest podobny do tendencji w innych rejonach Europy:
 - wyraźny wzrost temperatury powietrza w całym wieloleciu, największy w chłodnej części roku (listopad-kwiecień) – 2,1°C na 100 lat;
 - zjawiska „global dimming” (spadek usłonecznienia w latach 1950-1980) i „global brightening” (wzrost usłonecznienia w latach 1981-2016);
2. w przebiegu rocznym maksimum usłonecznienia przypada na przełom czerwca i lipca, a temperatury na połowę lipca; najszybszy wzrost usłonecznienia następuje na przełomie marca i kwietnia, a temperatury około dwa tygodnie później; podobne opóźnienie występuje przy spadku usłonecznienia i temperatury w październiku;
3. współczesnemu ociepleniu w Krakowie nie towarzyszy wzrost sum usłonecznienia, w przebiegu wieloletnim występuje nawet ich spadek;
4. przyczyną wzrostu temperatury powietrza, szczególnie silnego od lat 80. XX w., nie jest wzrost dopływu promieniowania słonecznego, lecz zatrzymanie w przyziemnych warstwach atmosfery ciepła z wypromieniowania Ziemi i/lub emisji sztucznego ciepła ze źródeł antropogenicznych;
5. największy przyrost temperatury powietrza występuje w półroczu chłodnym, kiedy główną rolę w jej kształtowaniu odgrywa cyrkulacja atmosferyczna i ciepło antropogeniczne;
6. związek usłonecznienia z temperaturą powietrza w półroczu ciepłym oznacza, że w tej części roku większy wpływ na temperaturę ma czynnik radiacyjny niż cyrkulacja atmosfery.

L i t e r a t u r a

- Bednar J., 1990, Recent changes of the sunshine in Prague Region, [w:] Climatic change in the historical and the instrumental periods, R. Brazdil (red.), Masaryk University, Brno, 240-242

- Beniston M., Stephenson D.B., 2004, Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions, *Global and Planetary Change*, 44 (1-4), 1-9, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.001
- Brázdil R., Flocas A.A., Sahsamanoglou H.S., 1994, Fluctuation of sunshine duration in central and South-Eastern Europe, *International Journal of Climatology*, 14 (9), 1017-1034, DOI: 10.1002/joc.3370140907
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D., 2006, Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850, *Journal of Geophysical Research*, 111, D12106, DOI: 10.1029/2005JD006548
- Degirmendzić J., 2004, Zmiany usłonecznienia w Polsce i ich uwarunkowania cyrkulacyjne, [w:] *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, K. Kozuchowski (red.), Wydawnictwo Biblioteka, Łódź, 9-23
- Dobesch H., 1992, On the variations of sunshine duration in Austria, *Theoretical and Applied Climatology*, 46 (1), 33-38, DOI: 10.1007/BF00866445
- Horecka V., 1990, Trend of sunshine in Slovakia, [w:] *Climatic change in the historical and the instrumental periods*, R. Brazdil (red.), Masaryk University, Brno, 246-248
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-J. Plattner, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, NY, USA, 1535 s.
- Kaszewski B.M., 1983, Próba wydzielenia naturalnych okresów synoptycznych na podstawie częstości typów cyrkulacji nad Polską, *Przegląd Geofizyczny*, 28 (2), 195-207
- Kitsara G., Papaioannou G., Papathanasiou A., Retalis A., 2012, Dimming/brightening in Athens: trends in sunshine duration, cloud cover and reference evapotranspiration, *Water Resources Management*, 27 (6), 1623-1633, DOI: 10.1007/s11269-012-0229-4
- Klein Tank A.M.G., Können G.P., 2003, Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999, *Journal of Climate*, 16 (22), 3665-3680, DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2
- Lewik P., Matuszko D., Morawska-Horawska M., 2010, Multi-annual variability of cloudiness and sunshine duration in Krakow between 1826 and 2005, [w:] *The Polish climate in the European context: an historical overview*, R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.), Springer Netherlands, Dordrecht Heidelberg, London, New York, 341-353
- Liepert B., 2002, Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990, *Geophysical Research Letters*, 29 (10), DOI: 10.1029/2002GL014910
- Lough J.M., Wigley T.M.L., Palutikof J.P., 1983, Climate and climate impact scenarios for Europe in a warmer world, *Journal of Applied Meteorology*, 22 (10), 1673-1684, DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1673:CACISF>2.0.CO;2
- Matuszko D., 2003, Cloudiness changes in Cracow in the 20th century, *International Journal of Climatology*, 23 (8), 975-984, DOI: 10.1002/joc.887

- Matuszko D. (red.), 2007, *Klimat Krakowa w XX wieku*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 251 s.
- Matuszko D., 2009, Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne (na przykładzie krakowskiej serii pomiarów), Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 232 s.
- Matuszko D., 2014, Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration, *International Journal of Climatology*, 34 (1), 228-234, DOI: 10.1002/joc.3681
- Matuszko D., 2016, Usłonecznienie w miastach na podstawie wybranych stacji w Europie, *Acta Geographica Lodziensia*, 104, 45-56
- Matuszko D., Węglarczyk S., 2014, Effect of cloudiness on long-term variability in air temperature in Krakow, *International Journal of Climatology*, 34 (1), 145-154, DOI: 10.1002/joc.3672
- Matuszko D., Węglarczyk S., 2015, Relationship between sunshine duration and air temperature and contemporary global warming, *International Journal of Climatology*, 35 (12), 3640-3653, DOI: 10.1002/joc.4238
- Mika J., 1990, Estimation of the relative sensitivity of regional climate as compared to global changes, [w:] *Climatic change in the historical and the instrumental periods*, R. Brázdil (red.), Masaryk University, Brno, 94-97
- Moberg A., Jones P.D., 2005, Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in Central and Western Europe analyzed 1901-1999, *International Journal of Climatology*, 25 (9), 1149-1171, DOI: 10.1002/joc.1163
- Norris J.R., Slingo A., 2009, Trends in observed cloudiness and Earth's radiation budget: what do we not know and what do we need to know?, [w:] *Clouds in the perturbed climate system*, J. Heintzenberg, R.J. Charlson (red.), MIT Press, Cambridge, MA, 17-36
- Norris J.R., Wild M., 2007, Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover solar "dimming" and solar "brightening", *Journal of Geophysical Research*, 112, D08214, DOI: 10.1029/2006JD007794
- Ohvri H., Neiman L., Teral H., Tee M., Russak V., Okulov O., Kallis A., Abakumova G., Terez E., Guschchin G., Terez G., Olmo F.J., Alados-Arboledas L., Laulainen N., 2006, Multi-annual variability of atmospheric transparency in some European locations, [w:] *książka abstraktów z konferencji Conference on Visibility, Aerosols and Atmospheric Optics*, 3-6 wrzesień, Wiedeń
- Ruckstuhl C., Norris J.R., 2009, How do aerosol histories affect solar "dimming" and "brightening" over Europe?: IPCC-AR4 models versus observations, *Journal of Geophysical Research*, 114, D00D04; DOI: 10.1029/2008JD011066
- Sanchez-Lorenzo A., Brunetti B., Calbó J., Martin-Vide J., 2007, Recent spatial and temporal variability and trends of sunshine duration over the Iberian Peninsula from a homogenized data set, *Journal of Geophysical Research*, 112, D20, DOI: 10.1029/2007JD008677

- Sanchez-Lorenzo A., Calbó J., Martin-Vide J., 2008, Spatial and temporal trends in sunshine duration over Western Europe (1938-2004), *Journal of Climate*, 21 (22), 6089-6098, DOI: 10.1175/2008JCLI2442.1
- Stanhill G., Cohen S., 2005, Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: evidence from sunshine duration measurements, *Journal of Climate*, 18, 1503-1512, DOI: 10.1175/JCLI3354.1
- Sun B., Groisman P.Y., 2000, Cloudiness variations over the former Soviet Union, *International Journal of Climatology*, 20 (10), 1097-1111, DOI: 10.1002/1097-0088(200008)20:10<1097::AID-JOC541>3.0.CO;2-5
- Warren S.G., Eastman R.M., Hahn C.J., 2007, A survey of changes in cloud cover and cloud types over Land from Surface Observations, 1971-1996, *Journal of Climate*, 20 (4), 717-738, DOI: 10.1175/JCLI4031.1
- Weber G.R., 1990, Spatial and temporal variations of sunshine in the Federal Republic of Germany, *Theoretical and Applied Climatology*, 41, 1-9, DOI: 10.1007/BF00866197
- Wibig J., 2008, Cloudiness variations in Łódź in the second half of the 20th century, *International Journal of Climatology*, 28 (4), 479-491, DOI: 10.1002/joc.1544

S t r e s z c z e n i e

Kraków należy do nielicznych miast w Europie, w którym pomiary usłonecznienia i temperatury powietrza wykonywane są w tym samym miejscu w całym okresie pomiarowym. Celem niniejszego opracowania jest charakterystyka zmienności usłonecznienia i temperatury powietrza oraz określenie związku między nimi.

W opracowaniu wykorzystano średnie dobowe wartości temperatury powietrza i sumy dzienne usłonecznienia z lat 1884-2016, pochodzące z pomiarów wykonywanych na stacji meteorologicznej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie.

Średnia roczna suma usłonecznienia wynosiła w badanym wieloleciu 1559,3 godzin, maksymalna – 1919,5 (w 1943 r.), a minimalna – 1067,2 (w 1980 r.). Średnia roczna temperatura powietrza wahała się od 6,4°C w 1940 r. do 11,3°C w 2015.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w Krakowie współczesnemu ociepleniu klimatu nie towarzyszy wzrost sum usłonecznienia, a w przebiegu wieloletnim występuje nawet ich spadek. Można zatem sądzić, że przyczyną wzrostu temperatury powietrza nie jest wzrost dopływu promieniowania słonecznego, lecz zatrzymanie w przyziemnych warstwach atmosfery ciepła z wypromieniowania Ziemi lub emisja sztucznego ciepła ze źródeł antropogenicznych. Największy przyrost temperatury powietrza występuje w chłodnym półroczu, kiedy główną rolę w kształtowaniu temperatury odgrywa cyrkulacja atmosferyczna, a do atmosfery dostarczane są dodatkowe ilości ciepła wynikające z ogrzewania domów.

Słowa kluczowe: usłonecznienie, temperatura powietrza, globalne ocieplenie, zmiany klimatu, Kraków.

S u m m a r y

Krakow is one of the few cities in Europe where sunshine duration and air temperature measurements have been performed at the same location throughout the entire measurement period. The aim of this paper is to characterize the variability of sunshine duration and air temperature and to define the relationship between these climate elements.

The data used were the average daily values of air temperature and daily sunshine duration totals from 1884-2016 measured at the meteorological station of the Jagiellonian University in Krakow.

The average annual sunshine duration total for the multi-year period is 1559.3 hours, while the maximum is 1919.5 (in 1943) and the minimum is 1067.2 (in 1980). The average annual air temperature varied from 6.4°C in 1940 to 11.3°C in 2015.

Based on the analysis, it was found that the contemporary climate warming in Krakow is not accompanied by an increase in sunshine duration totals; in fact a decrease over the multi-annual course has been noticed. It may be assumed that the increase in air temperature is not caused by the increase in solar radiation, but rather by the retention of heat in the Earth's atmosphere coming from the radiation of the Earth or the emission of heat from anthropogenic sources.

The biggest increase in the air temperature occurs in the cold half of the year, that is, when the atmospheric circulation plays a major role in shaping the temperature and when additional heat is supplied to the atmosphere due to heating the homes.

Key words: sunshine duration, air temperature, global warming, climate change, Krakow.