

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 165, 2021, 23–52

doi: 10.4467/20833113PG.21.008.14585

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

ZMIANY USŁONECZNIENIA RZECZYWISTEGO W POLSCE I ICH PRZYCZYNY (1966–2018)

Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska

Changes in sunshine duration in Poland and their causes (1966–2018)

Abstract: The study discusses changes in the sunshine duration in Poland, occurring in the years 1966–2018. The main analysis was carried out on a series of annual area sunshine duration, calculated from 11 stations, distributed relatively evenly throughout the area of Poland (variable UPL_{RK}). A discontinuity was found in the course of UPL_{RK} , consisting a quantum leap of this value in the years 1987–1989, and then the appearance of a statistically significant positive trend in the course of UPL_{RK} . A change in the course of UPL_{RK} and the total change in the sunshine duration regime occurred at the moment of change in ‘circulation epochs’, characterized by a change in the frequency structure of the mid-tropospheric circulation of macro-types W, E and C according to the Wangengejm-Girs classification. The frequency of these macro-types, by controlling the variability of the lower circulation (SLP fields), controls changes in sunshine duration. An increase in the frequency of the W macro-type, with which the UPL_{RK} values are positively correlated, and a simultaneous decrease in the frequency of the E macro-type, with which sunshine duration is negatively correlated, which occurred at the time of change of macro-circulation epochs in 1987–1989, resulted in corresponding changes in the behavior of the sunshine duration process in Poland. Changes in the frequencies of the W and E macro-types are controlled by changes in the distribution of heat resources in particular waters of the North Atlantic. These changes are controlled by changes in the North Atlantic Thermohaline Circulation (NA THC). As a result, the changes in the UPL_{RK} observed in the years 1966–2018 reconstruct changes in both the macro-circulation conditions in the Atlantic-European circulation sector and changes in the NA THC phases.

This allows for a conclusion that the variability of UPL_{RK} is a result of the internal dynamics of the climate system, and not, as it has been believed so far, the effects of anthropogenic changes in the concentration of aerosols in the atmosphere.

Keywords: sunshine duration, Poland, macro-circulation processes, thermohaline circulation, North Atlantic

Zarys treści: W pracy omówiono zmiany usłonecznienia rzeczywistego nad Polską, zachodzące w latach 1966–2018. Zasadniczą analizę przeprowadzono dla szeregu rocznego usłonecznienia obszarowego, obliczonego z 11 stacji względnie równomiernie rozłożonych na obszarze Polski (zmienna UPL_{RK}). Stwierdzono w przebiegu UPL_{RK} wystąpienie nieciągłości, polegającej na skokowym wzroście tej wielkości w latach 1987–1989, a następnie pojawienia się w nim statystycznie istotnego trendu dodatniego. Zmiana przebiegu UPL_{RK} i całkowita zmiana reżimu usłonecznienia nastąpiła w momencie zmiany „epok cyrkulacyjnych”, charakteryzowanych przez zmianę struktury frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej W, E i C według klasyfikacji Wangengejma-Girsa. Frekwencja tych makrotypów, poprzez sterowanie zmiennością cyrkulacji dolnej (polami SLP), steruje zmianami usłonecznienia. Wzrost frekwencji makrotypu W, z którym wartości UPL_{RK} skorelowane są dodatnio, i jednoczesny spadek makrotypu E, z którym usłonecznienie skorelowane jest ujemnie, jaki nastąpił w momencie zmiany epok makrocyrkulacyjnych w latach 1987–1989, pociągnął za sobą odpowiednie zmiany zachowania się przebiegu usłonecznienia nad Polską. Zmiany frekwencji makrotypów W oraz E sterowane są przez zmiany rozkładu zasobów ciepła w poszczególnych akwenach Atlantyku Północnego. Tymi zmianami sterują zmiany cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku Północnym (NA THC). W rezultacie obserwowane w latach 1966–2018 zmiany UPL_{RK} odtwarzają zmiany zarówno warunków makrocyrkulacyjnych w atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym, jak i zmiany faz NA THC. Pozwala to na twierdzenie, że zmienność UPL_{RK} stanowi rezultat działania wewnętrznej dynamiki systemu klimatycznego, a nie stanowi, jak do tej pory się uważa, skutków antropogenicznych zmian koncentracji aerozoli w atmosferze.

Słowa kluczowe: usłonecznienie, Polska, procesy makrocyrkulacyjne, cyrkulacja termohalinowa, Atlantyk Północny

Wprowadzenie

W niemal 130-letnim przebiegu sum usłonecznienia rocznego w Krakowie, rozpoczynającym się w 1884 r., Matuszko i Węglarczyk (2015) oraz 132-letnim (1884–2016; Matuszko i Piotrowicz 2018) stwierdzają występowanie statystycznie istotnego trendu ujemnego. W całym tym okresie wieloletni spadkowy trend usłonecznienia jest nieco silniejszy w półroczu ciepłym (04–09) niż w chłodnym półroczu (10–03). Z wyrównanych i niewyrównanych przebiegów usłonecznienia rocznego w Krakowie (Matuszko, Węglarczyk 2015; ryc. 1 w Matuszko, Piotrowicz 2018) wynika, że w latach 1884–2016 usłonecznienie roczne wykazywało znaczne zmiany długookresowe, prze-

kraczące 500 godzin, a w ostatnim okresie – w przybliżeniu od przełomu lat 70. i 80. XX w. – występuje w tym przebiegu stosunkowo silny subtrend dodatni. W 1980 r. wartość usłonecznienia rocznego w Krakowie wynosiła około 1100, a w latach 2015 i 2016 przekraczała 1700 godzin, czyli nastąpił wzrost o około 600 godzin. Ostatnie wartości usłonecznienia rocznego są większe od najwyższych wartości w początkowej części szeregu z końca XIX wieku (Matuszko, Piotrowicz 2018). Również Bartoszek i in. (2020) potwierdzili występowanie w latach 1971–2018 statystycznie istotnego, silnego ($+10,52 \text{ godz.}\cdot\text{rok}^{-1}$) dodatniego trendu usłonecznienia nad Polską.

Taki obraz sugeruje, że usłonecznienie rzeczywiste jest jednym, obok temperatury powietrza, z najsilniej i najszybciej zmieniających się elementów klimatycznych nad obszarem Polski w czasie ostatniego pięćdziesięciolecia.

Występowanie istotnego statystycznie dodatniego trendu w szeregach usłonecznienia nad Polską z lat 1971–2003 i 1976–2000 sygnalizowali już Degirmendżić (2004) oraz Koźmiński i Michalska (2004). W obu tych pracach zwrócono uwagę na występowanie silnego, dodatniego trendu usłonecznienia w maju i sierpniu oraz silnych, statystycznie istotnych trendów usłonecznienia rocznego. W latach 1976–2000 wzrosła również w Polsce liczba dni z usłonecznieniem dłuższym niż 4 godziny (ryc. 7 w Koźmiński, Michalska 2006).

Podstawczyńska (2004; 2007a, b), na podstawie analizy serii usłonecznienia na stacji Łódź-Lublinek w pięćdziesięcioleciu 1951–2000, wykryła istnienie dodatnich trendów usłonecznienia we wszystkich, poza jesienią, porach roku oraz istotny statystycznie trend w przebiegu usłonecznienia rocznego ($3,55 \text{ godz.}\cdot\text{rok}^{-1}$). Silne, istotne statystycznie trendy dodatnie w Łodzi występowały w maju ($+1,62$) i sierpniu ($+0,96$), relatywnie silny ($-0,70 \text{ godz.}\cdot\text{rok}^{-1}$) i istotny ujemny trend usłonecznienia występował również we wrześniu. Szczególnie silny wzrost liczby godzin ze Słońcem nastąpił „w ostatnim 10-leciu XX w.” (Podstawczyńska 2004, 2007a, b). Na fakt zmiany „tendencji” usłonecznienia w Krakowie, jaka nastąpiła w „drugiej połowie lat osiemdziesiątych” [XX wieku], zwraca uwagę również Morawska-Horawska (2002). Ten krótko zarysowany przegląd kilku pozycji literatury zdaje się wskazywać, że zmiana trendu wartości usłonecznienia rocznego nad Polską nastąpiła między końcem lat 70. i 80. XX w., a więc w przybliżeniu w tym samym czasie, w którym w klimacie Polski zaznaczyła się zmiana warunków klimatycznych, zwłaszcza radykalny wzrost temperatury powietrza.

Celem artykułu jest przedstawienie najważniejszych wyników badań nad zmianami usłonecznienia, jakie zachodziły nad obszarem Polski w okresie między 1966 r. a 2018 r. Tak nietypowy okres analizy uwarunkowany jest dostępnością dla autorów szeregów czasowych usłonecznienia. Jednym z ważniejszych celów przeprowadzonych badań była próba określenia przyczyn i mechanizmów klimatycznych, które doprowadziły do zmian usłonecznienia nad obszarem Polski. Problematykę zróżnicowania regionalnego usłonecznienia uznano za kwestię drugorzędą wobec istnienia

prac, w których problematyka ta, wykorzystująca zarówno starsze (1951–1975; Kuczmański 1990), jak i stosunkowo nowe serie obserwacyjne (1976–2000, Koźmiński, Michalska 2005; 1971–2018, Bartoszek i in. 2020), jest obszernie przedstawiona.

Materiały źródłowe, metody badań

W opracowaniu posłużono się przetworzonymi danymi obserwacyjnymi IMGW PIB, zawierającymi miesięczne i roczne sumy usłonecznienia. Udostępnione serie obserwacyjne rozpoczynają się od 1966 r. Na wielu stacjach obserwacje usłonecznienia rozpoczynają się później i/lub kończą się wcześniej niż w 2018 r. W materiale źródłowym są liczne przerwy w obserwacjach, na niektórych stacjach (np. w Warszawie) zestawione wartości usłonecznienia wzbudzają poważne wątpliwości co do ich realności. Jedynie na pięciu stacjach polskich dane dla okresu od stycznia 1966 r. do grudnia 2018 r. są kompletne. Z tego względu opracowanie oparto na danych z 20 stacji, na których serie wartości rocznych usłonecznienia były nie krótsze od 50 lat, a liczba braków obserwacji jak najmniejsza. Przerwy w przyjętych do analizy szeregach z tych stacji stanowią najczęściej braki od jednej do trzech sum miesięcznych usłonecznienia. Braki te, choć stanowią ułamek procenta obserwacji na danej stacji, nie pozwalają na obliczenie w danym roku sumy usłonecznienia rocznego, które jest syntetyczną informacją o zachodzących zmianach. Rzadziej zdarzają się dłuższe ciągłe przerwy w obserwacjach, dochodzące do 2 lat (np. Koszalin – brak danych z lat 1974 i 1975, Toruń – brak danych za lata 1980 i 1981). Braki danych na poszczególnych stacjach mają rozkład losowy w funkcji czasu.

Wykorzystane w analizie stacje to: Białystok, Chojnice, Katowice, Kołobrzeg i Suwałki (serie 53-letnie), Gorzów Wielkopolski, Łódź, Poznań, Szczecin, Zakopane, Zielona Góra (serie 52-letnie), Lesko, Leszno, Opole, Włodawa (serie 51-letnie) oraz Jelenia Góra, Koszalin, Mikołajki, Nowy Sącz i Toruń (serie 50-letnie)¹. Rozkład przestrzenny przyjętych do analizy stacji nie jest równomierny, wyraźnie zaznacza się „nadreprezentacja” stacji położonych na obszarze zachodniej Polski. Brakuje wystarczająco długich i pełnych serii obserwacyjnych ze środkowych i południowo-wschodnich części kraju². Ponieważ zasadniczym celem pracy jest analiza zmienności

¹ Uzupełnienie dłuższych okresów braków danych na konkretnej stacji na podstawie miesięcznych sum usłonecznienia ze stacji sąsiednich, zwłaszcza braków dłuższych niż z 3 kolejnych miesięcy, uznano za ryzykowne. Usłonecznienie nie jest funkcją ciągłą w czasie i przestrzeni, w związku z tym obliczanie wartości dla jakiejś stacji ze stacji pobliskich przenosi odpowiednią część wariancji ze stacji obokległych do szeregu tej stacji. Może to obciążać wartości trendów, prowadząc w konsekwencji do wyciągania niezasadnionych wniosków.

² Niestety, autorom nie udało się uzyskać danych ze stacji Puławy (Górski, Górską 2000) po 1992 r. Z tego względu ta stacja, mająca długą serię obserwacyjną, nie została uwzględniona w opracowaniu.

uśłonecznienia w funkcji czasu, nie zaś przestrzenna analiza zróżnicowania uśłonecznienia na obszarze Polski, taki nierównomierny rozkład stacji w przestrzeni, choć w pewnych momentach kłopotliwy, nie uniemożliwia realizacji postawionego celu.

Spośród wymienionych 20 stacji, w których szeregi obserwacyjne rozpoczynają się od 1966 r., wybrano do bardziej szczegółowej analizy 11 stacji – Kołobrzeg, Suwałki, Szczecin, Chojnice, Białystok, Poznań, Łódź, Włodawę, Jelenią Górę, Katowice i Lesko. Spośród nich pięć posiada dane kompletne (Kołobrzeg, Suwałki, Chojnice, Białystok i Katowice), na pozostałych sześciu stacjach uzupełniono brakujące wartości miesięcznych sum uśłonecznienia. Braki danych uzupełniano metodą regresji wielokrotnej, obliczając brakujące wartości uśłonecznienia miesięcznego z wartości uśłonecznienia na dwóch pobliskich stacjach. Dotyczyło to sytuacji, gdy na wybranej stacji brakowało w szeregu czasowym od 01.1966 do 12.2018 nie więcej niż trzech obserwacji miesięcznych. Były to stacje Łódź, Poznań, Szczecin (po jednej uzupełnionej wartości miesięcznej), Lesko i Włodawa (po 2) oraz Jelenia Góra (3 uzupełnione wartości miesięczne). Z danych wymienionych 11 stacji obliczono średnie miesięczne, roczne oraz średnie sumy dla okresu od kwietnia do sierpnia włącznie. Tak obliczone zmienne traktuje się dalej jako średnie obszarowe, opisujące w syntetyczny sposób zmienność uśłonecznienia nad Polską. Zostały one oznaczone jako UPL z odpowiednimi indeksami dolnymi (UPL_{01} , UPL_{02} , UPL_{03} , ..., UPL_{RK} , UPL_{04-08}).

Szeregi frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej W, E i C, według klasyfikacji Wangengejma-Girsa (Vangengejm 1952; Girs 1964) stanowią dane opracowane przez AANII (Arkticheskij i Antarkticheskij Nauchno-Issledovatel'skij Institut, Peterburg, RF), część z nich pochodzi z załącznika nr 1 do pracy Dimitrieva i Belyazo (2006), pozostałą część autorzy otrzymali dzięki uprzejmości dra V.E. Łaguna z AANII.

Wskaźnik charakteryzujący intensywność cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku Północnym, oznaczony dalej jako DG_{3L} , został opracowany przez jednego z autorów tej pracy. Sposób obliczania tego wskaźnika opisany jest w pracach Marsza i Styszyńskiej (2009) i Marsza (2015a, b), a szczegółowe uzasadnienie fizyczne jego konstrukcji zawiera załącznik 1 do pracy Marsza (2015b). Tamże znajduje się szereg czasowy wartości wskaźnika DG_{3L} z lat 1880–2015. Pozostałe wartości (2016–2018) zostały doliczone przez autorów.

Do analizy danych wykorzystano głównie korelacje liniowe, analizę regresji i analizę wariancji. Istotność związków sprawdzano stosownymi testami (testem t, testem F). W przypadku analizy regresji i korelacji liniowych stosowano zasadę usuwania braku danych przypadkami, co oznacza, że brak danych w którymś z miesięcy eliminował z obliczeń dla danej stacji wszystkie pozostałe miesiące w tym roku. Braki danych w średnich rocznych rzędu od 1 do 3 lat, przy długości ciągu nie krótszego od 50 lat, nie wnoszą w charakterystyki statystyczne zbiorów poważniejszych różnic. Zarówno

wartości współczynników korelacji, jak i wartości trendów pozostają praktycznie takie same (mieszczą się w granicach ich standardowych błędów estymacji), gdy z szeregu np. 52-letniego usunie się losowo jedną lub dwie wartości³.

Przebieg usłonecznienia rocznego nad Polską w latach 1966–2018

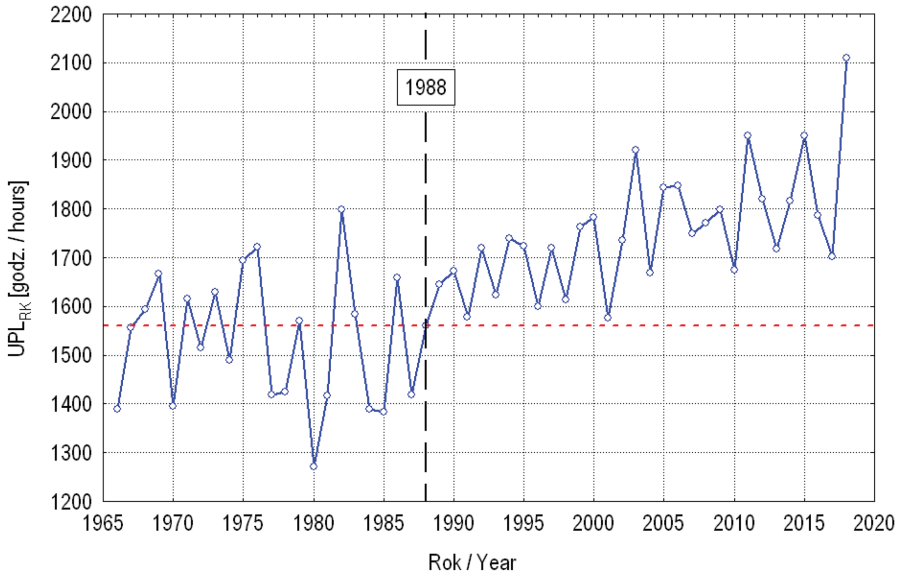
Relatywnie duża zmienność przestrzenna przebiegu usłonecznienia nad Polską utrudnia klarowne przedstawienie zmian w czasie tego elementu klimatycznego. Z tego względu posłużono się średnimi obszarowymi, tak aby występujące niewielkie odchylenia o odmiennych znakach występujące w tych samych momentach na różnych stacjach znosiły się, zachowując jednak generalne cechy zmian przebiegu w czasie.

Uśredniony z jedenastu stacji przebieg wartości rocznego usłonecznienia (UPL_{RK}) przedstawia ryc. 1. Tak obliczona uśredniona wartość UPL_{RK} jest bardzo silnie (r od 0,88 do 0,96) skorelowana z przebiegami rocznego usłonecznienia na wszystkich pozostałych 9 stacjach, które nie posłużyły do obliczenia tej średniej. Można zatem przyjąć, że przebieg ten oddaje zasadnicze cechy zmian w czasie przebiegu usłonecznienia rocznego na obszarze Polski.

Najważniejszą cechą przebiegu jest występujący w nim silny trend dodatni (ryc. 1). Wartość trendu UPL_{RK} jest równa $+7,60 (\pm 1,09)$ godz.·rok⁻¹. Trend ten jest wysoce istotny ($p < 0,001$) i objaśnia 48% wariancji UPL_{RK} w rozpatrywanym okresie. Wartość trendu wyjaśnia, że między 1966 a 2018 rokiem roczna suma godzin operacji słonecznej nad Polską wzrosła od 329 do 448 godzin (średnio około 395–400 godzin). Wyniki analizy trendów na poszczególnych, uwzględnionych w tej analizie stacjach w całym rozpatrywanym okresie lat 1966–2018 zestawiono w tab. 1.

Na wszystkich stacjach występuje dodatni trend usłonecznienia rocznego, przy czym z wyjątkiem trzech stacji (Suwałki, Toruń i Zakopane) jest on wysoce istotny. Wartości trendów mieszczą się w przedziale między $+3,1$ (Suwałki, Zakopane) a $+13,0$ (Opole) godzin na rok. Średnia wartość trendu na 20 stacjach jest równa $+7,47 (\pm 0,63)$, a więc w granicach błędu estymacji, taka sama jak trendu UPL_{RK} .

³ Na przykład w przypadku analizy szeregów miesięcznych usłonecznienia na stacji Poznań wyznaczenie trendu liniowego w czerwcu (szereg 53-letni, dane kompletne) daje rezultat $+1,18 (\pm 0,43)$ godziny ($p < 0,009$). Usunięcie z tego szeregu danych z czerwca 1988 r. (wybór losowy, długość szeregu 52 lata) daje wartość trendu równą $+1,15 (\pm 0,43)$ godziny ($p < 0,009$), usunięcie danych z czerwca 1988 r. i czerwca 2015 r. (długość szeregu 51 lat) daje wartość trendu równą $+1,21 (\pm 0,44)$ godziny ($p < 0,009$). Wartości współczynników trendu różnią się o części setne, gdy błąd standardowy estymacji każdej z tych wartości jest o rząd wielkości większy. Znaczna długość szeregu powoduje, że mimo zmniejszenia się liczebności zbioru poziom istotności oszacowania nie ulega zmianie.



Ryc.1. Przebieg wartości „obszarowego” usłonecznienia rocznego (UPL_{RK} ; godziny), uśrednionego z jedenastu stacji zawierających kompletne dane miesięczne (5) i posiadających minimalne przerwy w obserwacjach (uzupełniono od 1 do 3 brakujących wartości usłonecznienia miesięcznego). Oznaczona (pionowa linia przerywana) zmiana reżimu usłonecznienia rocznego nad Polską oraz wartość usłonecznienia rocznego 1560 godzin, powyżej której po roku 1988 systematycznie utrzymuje się wartość UPL_{RK} (pozioma linia przerywana)

Fig. 1. Course of the “area” annual sunshine duration sums (UPL_{RK} ; hours), averaged over eleven stations containing complete monthly data (5) and having minimal observation intervals (supplemented with 1 to 3 missing monthly sunshine duration sums). Change in the annual sunshine duration regime over Poland marked (vertical dotted line) as well as the value of the annual sunshine duration of 1560 hours, above which, after 1988, the UPL_{RK} value systematically remains (horizontal dashed line)

Tab. 1. Wartości trendów usłonecznienia rocznego (U_{RK} ; godz.·rok⁻¹) na wybranych stacjach Polski, ich istotność (p) i odsetek objaśnienia zmienności U_{RK} na danej stacji przez trend (wartość adj.R²·100%). Okres 1966–2018. Lata, w których wystąpiły braki lub uzupełnienia danych, oznaczono w tabeli

Tab. 1. Annual sunshine duration trends (U_{RK} ; hours·year⁻¹) at selected Polish stations, their significance (p) and percentage of explanation of the variability of U_{RK} at a given station by the trend (adj.R² value 100%). Period 1966–2018. The years with missing or supplemented data are marked in the table

Nr No.	Stacja Station	Długość szeregu danych (lata) Length of the data series (years)	Braki danych (lata) i uzupełnienia braków (B, miesiące) Missing data (years) and filling gaps (B, months)	Wartość trendu (godz.·rok ⁻¹) Value of trend (hours·year ⁻¹)	Istotność trendu Significance of trend p <	adj.R ² ·100%
1	Białystok	53	-	+6,8(±1,3)	0,000	34,5
2	Chojnice	53	-	+7,8(±1,4)	0,000	35,7
3	Gorzów	52	1968	+9,9(±1,5)	0,000	46,6
4	Jelenia Góra	53	B = 3	+11,9(±1,3)	0,000	60,2
5	Katowice	53	-	+11,4(±1,3)	0,000	59,1
6	Kołobrzeg	53	-	+5,6(±1,4)	0,001	23,4
7	Koszalin	50	1974, 1975, 2016	+7,7(±1,8)	0,001	27,1
8	Lesko	53	B = 2	+8,5(±1,2)	0,000	47,0
9	Leszno	51	2014, 2015	+6,7(±1,5)	0,000	28,1
10	Łódź	53	B = 1	+6,6(±1,4)	0,000	30,2
11	Mikołajki	50	1992, 1993, 2014	+5,1(±1,4)	0,001	19,2
12	Nowy Sącz	50	2014, 2015, 2017	+6,0(±1,3)	0,000	27,6
13	Opole	51	1977, 2017	+13,0(±1,3)	0,000	65,7
14	Poznań	53	B = 1	+10,3(±1,3)	0,000	53,0
15	Suwałki	53	-	+3,1(±1,3)	0,021	8,2
16	Szczecin	53	B = 1	+7,6(±1,3)	0,000	37,1
17	Toruń	50	1980, 1981, 2003	+4,2(±1,4)	0,005	14,1
18	Włodawa	53	B = 2	+4,6(±1,1)	0,001	22,6
19	Zakopane	52	1989	+3,1(±1,0)	0,005	13,2
20	Zielona Góra	52	1966	+7,6(±1,8)	0,000	26,2

Uwaga do tab. 1: wartości p zapisane jako 0,000 oznaczają, że $p \ll 0,001$. Wartości B wskazują na liczbę przypadków oszacowania średniej miesięcznej, uzupełniających braki danych. Jeśli w kolumnie „Braki danych (lata)...” wpisane są numery lat, oznacza to, że trend oszacowany został z pominięciem tych lat. Note to tab. 1: p values written as 0.000 mean that $p \ll 0.001$. The B values indicate the number of cases where the monthly average was estimated, supplementing the missing data. If in the column “Missing data (years)...” there are numbers of years, it means that the trend was estimated excluding these years.

Łącznie trendy mieszczące się w granicach między 6,0 a 13,0 godz.·rok⁻¹ występują na 70% stacji (14 przypadków). Tylko na 10% stacji (2 przypadki) trendy są mniejsze od 4,0 godzin na rok. Najsilniejsze trendy (10,0 i więcej godzin na rok) występują na obszarze południowo-zachodniej i zachodniej Polski (Jelenia Góra, Opole, Katowice i Poznań).

Przebieg wartości UPL_{RK} w rozpatrywanych latach wykazuje wyraźną dwudzielność. Granicą okresów różniących się charakterem przebiegu i statystykami podzbiorów danych są lata 1987–1990. Dalej arbitralnie przyjmuje się 1988 r., jako granicę między tymi okresami. Lewik i in. (2010), dzieląc dwiema odmiennymi metodami szereg zachmurzenia rocznego w Krakowie na względnie jednorodne pod względem charakteru zmienności okresy, również wykryli nieciągłość w szeregu, polegającą na zmianie zakresu zmienności i zmianie trendu usłonecznienia, którą datowali na 1987r.

Pierwszy okres (lata 1966–1988) charakteryzuje się znacznymi wahaniami międzyrocznymi i relatywnie niską średnią wartością UPL_{RK} (średnia 1528,6, $\sigma = 134,0$, $n = 23$) oraz występowaniem trendu bliskiego zeru ($-1,99(\pm 4,29)$ godz.·rok⁻¹, $p = 0,647$). Drugi okres (1988–2018) charakteryzuje się występowaniem w nim dodatniego, wysoce istotnego trendu ($+8,90(\pm 1,93)$ godz.·rok⁻¹, $p < 0,001$), istotnie wyższą średnią oraz pewnym zmniejszeniem wahań międzyrocznych (średnia 1747,7, $\sigma = 124,1$, $n = 31$). W drugim okresie w żadnym roku wartości UPL_{RK} nie spadły poniżej wartości 1560 godzin, co było częste w pierwszym okresie (~60% przypadków).

Na obszarze zachodniej Polski granica między dwoma charakterami reżimów usłonecznienia rocznego ma charakter skokowy. Na licznych stacjach, które mają braki w obserwacjach lub ze względu na ich położenie nie zostały przyjęte do obliczenia średniej obszarowej (np. Zielona Góra, Gorzów, Opole, ...), lub ze względu na znaczną liczbę przerw w obserwacjach nie są analizowane w tej pracy (np. Kłodzko, Wrocław, ...) występuje w tym samym momencie (lata 1987–1989) również skokowy wzrost krzywej usłonecznienia rocznego, po którym średnio wartości usłonecznienia w kolejnych latach utrzymują się na wyższym poziomie i rosną. Na stacjach z obszaru wschodniej Polski (Suwałki, Białystok, Włodawa, Lesko) skok ten nie jest tak wyraźnie widoczny, zmienia się tylko w latach 1987–1989 zakres międzyrocznych zmian usłonecznienia i pojawia w szeregach dodatni trend.

Oszacowanie trendów U_{RK} w obu okresach na poszczególnych stacjach (tab. 2) wykazuje, że przeciętne trendy w pierwszym okresie są bliskie zeru, jedynie na dwóch stacjach – w Koszalinie i Zakopanem – trendy są silne, ujemne i statystycznie istotne. W drugim okresie na wszystkich rozpatrywanych stacjach trendy mają taki sam – dodatni – znak i bez wyjątku są istotne statystycznie, przy czym na 40% stacji trendy te są wysoce istotne.

Największe wartości trendów (współczynników kierunkowych linii trendu) w drugim okresie, spośród rozpatrywanych 20 stacji, występują w Jeleniej Górze, Zielonej

Górze, Opolu, Katowicach, Nowym Sączu oraz w Kołobrzegu i Koszalinie, gdzie ich wartości przekraczają 10 godzin w roku. Najniższe wartości trendów, mniejsze od 6 godzin w roku, występują w Suwałkach, Mikołajkach i Włodawie. Taki rozkład trendów sugeruje, że wzrost usłonecznienia w okresie lat 1988–2018 jest silniejszy w południowo-zachodniej i zachodniej Polsce, słabszy w północno-wschodniej i wschodniej części kraju.

Tab. 2. Wartości trendów usłonecznienia rocznego (godz.·rok⁻¹) na wybranych stacjach Polski w okresie 1966–1988 oraz 1988–2018 i ich istotność statystyczna

Tab. 2. Annual sunshine duration trends (hours-year⁻¹) at selected Polish stations in the periods 1966–1988 and 1988–2018, and their statistical significance

Nr No.	Stacja Station	1966–1988		1988–2018	
		Wartość trendu (godz.·rok ⁻¹) Value of trend (hours-year ⁻¹)	Istotność trendu Significance of trend p <	Wartość trendu (godz.·rok ⁻¹) Value of trend (hours-year ⁻¹)	Istotność trendu Significance of trend p <
1	Białystok	-4,14(±5,23)	0,438	+6,78(±2,08)	0,003
2	Chojnice	-9,81(±5,02)	0,064	+8,68(±2,37)	0,001
3	Gorzów	+3,50(±5,69)	0,546	+8,64(±3,16)	0,011
4	Jelenia Góra	+0,69(±4,56)	0,881	+17,16(±2,64)	0,000
5	Katowice	-1,64(±4,62)	0,727	+11,45(±2,52)	0,000
6	Kołobrzeg	-2,03(±5,16)	0,698	+10,40(±2,66)	0,001
7	Koszalin	-13,88(±4,99)	0,012	+10,92(±3,24)	0,002
8	Lesko	+4,23(±4,92)	0,400	+9,87(±2,46)	0,001
9	Leszno	-3,10(±5,28)	0,563	+9,11(±2,90)	0,004
10	Łódź	-1,89(±5,19)	0,719	+9,02(±2,68)	0,002
11	Mikołajki	-6,63(±5,35)	0,229	+5,55(±2,68)	0,048
12	Nowy Sącz	-5,14(±4,37)	0,253	+11,67(±2,56)	0,000
13	Opole	+0,83(±4,58)	0,858	+12,34(±2,47)	0,000
14	Poznań	+4,09(±5,18)	0,438	+6,54(±2,53)	0,015
15	Suwałki	-4,50(±4,83)	0,362	+5,44(±2,58)	0,044
16	Szczecin	-4,27(±4,42)	0,539	+7,50(±2,85)	0,013
17	Toruń	-5,61(±4,69)	0,246	+8,53(±2,83)	0,005
18	Włodawa	-2,66(±4,64)	0,572	+4,71(±2,04)	0,029
19	Zakopane	-7,56(±3,07)	0,023	+6,70(±2,23)	0,006
20	Zielona Góra	-10,42(±5,54)	0,074	+13,62(±3,51)	0,001

Uwaga do tab. 2: wartości p zapisane jako 0,000 oznaczają, że $p \ll 0,001$.

Note to tab. 2: p values written as 0.000 mean that $p \ll 0.001$.

Wyniki tej analizy wykazują, że cały wzrost usłonecznienia rocznego nad Polską w rozpatrywanym okresie lat 1966–2018 nastąpił po 1988 r. Było to skutkiem skokowego wzrostu usłonecznienia między 1987 r. a 1989 r., a następnie, przy utrzymywaniu się usłonecznienia na wyższym niż poprzednio (1966–1988) poziomie, wystąpienia silnego i istotnego statystycznie trendu dodatniego. Moment zmiany reżimu usłonecznienia i pojawienie się dodatniego trendu w jego przebiegu następuje kilkanaście lat wcześniej, od momentu, w którym na stacjach IMGW zaczęto wprowadzać czujniki do pomiaru usłonecznienia o znacznie większej czułości progowej od heliografów (Matuszko 2012). Można więc wykluczyć, że stwierdzona nieciągłość przebiegu i pojawienie się dodatniego trendu usłonecznienia jest rezultatem zmiany metod pomiaru na stacjach IMGW.

Zmiany miesięcznych sum usłonecznienia

Analiza miesięcznych trendów obszarowych ($UPL_{01}-UPL_{12}$) wykazuje, że nad obszarem Polski są one we wszystkich miesiącach roku dodatnie lub zerowe⁴ (tab. 3), co oznacza, że w rozpatrywanym okresie usłonecznienie w ciągu całego roku wzrastało. Istotne statystycznie trendy występują w okresie od marca do listopada, przy czym wysoce istotny trend tylko w kwietniu. Najslabsze trendy, statystycznie nieistotne, praktycznie bliskie zeru, występują od grudnia do lutego (0,15 do 0,25 godz. \cdot rok⁻¹). Bardzo silne trendy, większe od 1 godz. \cdot rok⁻¹ w danym miesiącu występują w kwietniu i maju oraz lipcu i sierpniu.

Analiza trendów usłonecznienia w kolejnych miesiącach roku na 11 stacjach, które posłużyły do obliczania średnich obszarowych (tab. 3), wykazuje, że istotne trendy o dodatnim znaku grupują się w okresie od marca do października włącznie. Poza tym okresem statystycznie istotne trendy występują jedynie w Szczecinie (w styczniu i lutym) oraz w Lesku (w listopadzie i grudniu). Jedynym miesiącem, w którym na wszystkich jedenastu stacjach oszacowane wartości trendów są statystycznie istotne, jest kwiecień. W tym miesiącu na około 70% stacji trendy te są wysoce istotne. Największa liczba stacji z dodatnimi, istotnymi trendami występuje w kwietniu (11 stacji) i maju (10 stacji) oraz w marcu i wrześniu (po 6 stacji). W czerwcu i październiku istotne, dodatnie trendy usłonecznienia notuje się na 5 stacjach. Konsekwentnie występujące istotne trendy od kwietnia do sierpnia włącznie występują tylko na stacjach Jelenia Góra, Katowice i Lesko, położonych na południu Polski, oraz w Poznaniu.

⁴ Trendy z ujemnym znakiem (tab. 3) są statystycznie nieistotne, nie można odrzucić hipotezy, że są one równe zero.

Przedstawiony w tab. 3 rozkład trendów miesięcznych bardzo silnie odbiega od rozkładu trendów usłonecznienia nad Polską w latach 1952–2001, omawianego przez Koźmińskiego i Michalską (2004). Według tych badaczy w latach 1951–2000 trend usłonecznienia we wrześniu był ujemny i na większości obszaru kraju trend ten był statystycznie istotny. Podobnie, w stosunku do okresu 1951–2000 zmienił się znak trendu usłonecznienia w marcu, najsilniejszy wzrost usłonecznienia przesunął się z maja na kwiecień, a same wartości trendów osiągają 2-, 3-krotnie większe wartości⁵.

Rozkład przestrzenny stacji i ich zagęszczenie na obszarze kraju nie upoważnia do wyciągania dalej idących wniosków na temat regionalnego zróżnicowania

Tab. 3. Wartości trendów usłonecznienia miesięcznego (godz.-rok⁻¹ w miesiącu) na wybranych stacjach i w Polsce (UPL – średnia obszarowa). Wartości trendów istotne statystycznie ($p < 0,05$) pogrubiono, wysoce istotne ($p < 0,001$) oznaczono dodatkowo *. Okres 1966–2018. Wszystkie szeregi liczą 53 lata, braki uzupełnione

Table 3. Monthly sunshine duration trends (hour-year⁻¹ per month) at selected stations and in Poland (UPL – area average). Trend values statistically significant ($p < 0.05$) marked in bold, highly significant ($p < 0.001$) were additionally marked *. Period 1966–2018. All series are 53 full years, gaps filled

Stacja Station	Miesiące / Months											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Kołobrzeg	0,14	0,32	0,67	1,19	1,01	0,45	0,60	0,03	0,87	0,31	0,17	-0,12
Suwałki	-0,12	-0,16	0,28	1,12	0,84	0,11	0,22	0,11	0,52	0,33	-0,07	-0,15
Szczecin	0,41	0,42	0,58	1,54*	0,82	0,57	0,79	0,45	1,04	0,65	0,29	0,11
Chojnice	0,12	0,31	0,68	1,57*	1,32	0,48	0,62	0,48	1,21*	0,72	0,19	0,06
Białystok	-0,07	0,06	0,32	1,30*	1,47*	0,89	0,71	0,79	0,55	0,52	0,13	0,12
Poznań	0,25	0,33	0,57	1,82*	1,33	1,18	1,44	1,30*	1,03	0,57	0,32	0,12
Łódź	0,05	0,16	0,46	1,24*	1,02	0,61	0,69	0,74	0,74	0,46	0,22	0,20
Włodawa	-0,16	-0,13	0,24	0,87	1,01	0,69	0,42	0,49	0,35	0,66	0,14	0,10
J. Góra	0,36	0,49	0,84	1,60*	1,51*	1,48*	1,67*	1,58*	0,80	0,34	0,63	0,62
Katowice	0,26	0,24	0,92*	1,52*	1,27	1,21	1,63*	1,80*	1,16	0,55	0,52	0,33
Lesko	-0,04	0,09	0,26	1,45*	1,13	1,21	1,24	1,35*	0,65	0,34	0,41	0,32
UPL	0,11	0,19	0,53	1,38*	1,16	0,81	0,91	0,83	0,81	0,49	0,27	0,16

⁵ O ile podane w tab. 1 Koźmińskiego i Michalskiej (2004) wartości, opisane jako „współczynniki korelacji trendu liniowego miesięcznych sum usłonecznienia rzeczywistego” (?) są rzeczywiście wartościami trendu liniowego, a nie na przykład współczynnikami korelacji między numerami kolejnymi lat a usłonecznieniem.

miesięcznych zmian usłonecznienia, choć wartości trendów miesięcznych zdają się sugerować, że procesy wzrostu usłonecznienia są silniejsze na zachodzie i południu niż na północy i wschodzie Polski.

Trendy średnich „obszarowych” wartości usłonecznienia miesięcznego wykazują, że istotnie statystyczny wzrost usłonecznienia nad Polską w latach 1966–2018 występuje w okresie od marca do września, z wyraźnie zarysowanym maksimum przypadającym na kwiecień–maj (tab. 3). Oznacza to, że w ujęciu sezonowym najsilniejszy wzrost usłonecznienia przypada na wiosnę.

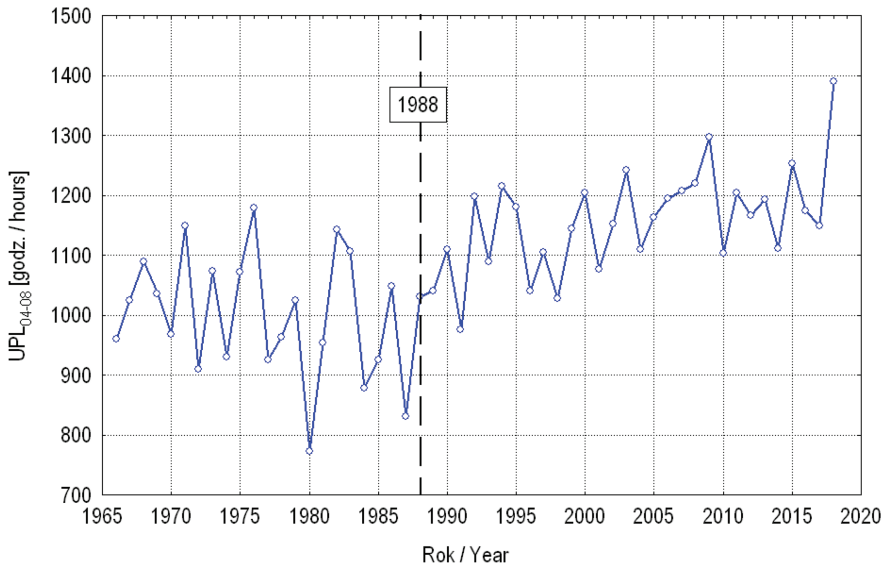
Niezależnie od tego, czy oszacowane wartości trendów są statystycznie istotne, czy nie⁶, można zauważyć, że najwyższe ich wartości grupują się w okresie od marca do września, a więc w okresie miesięcy „długiego dnia”. Miesięczne zmiany usłonecznienia w okresie, w którym w ciągu wszystkich dni w miesiącu deklinacja Słońca jest dodatnia (kwiecień–sierpień, a w każdej dobie miesiąca należącego do tego okresu dzień jest dłuższy od 12 h), determinują wartość usłonecznienia rocznego. Dalej zmienną tą oznacza się jako UPL_{04-08} . Zmienność UPL_{04-08} objaśnia ~84% wariacji obszarowego rocznego usłonecznienia ($R = 0,92$, $F(1,51) = 279,1$, $p \ll 0,001$). Podobnie jest na wszystkich dwudziestu rozpatrywanych stacjach – zmienność U_{04-08} objaśnia na nich ponad 75% (77 do 92%) wariacji usłonecznienia rocznego. Wyjaśnia to, że obserwowany wzrost UPL_{RK} jest spowodowany przede wszystkim wydłużeniem się czasu operacji Słońca w okresie od kwietnia do sierpnia.

Skokowa zmiana warunków usłonecznienia, jaka zaszła między 1987 a 1989 r., jest w przebiegu UPL_{04-08} obliczonej dla jedenastu stacji wyraźna (ryc. 2), znacznie wyraźniejsza niż w przebiegu usłonecznienia rocznego (UPL_{RK} z tych stacji).

Wystąpienie nieciągłości w przebiegu usłonecznienia nad Polską uzasadnia szczególnie poświęcenie uwagi temu zagadnieniu, również w odniesieniu do miesięcy „krótkiego dnia” w obu okresach.

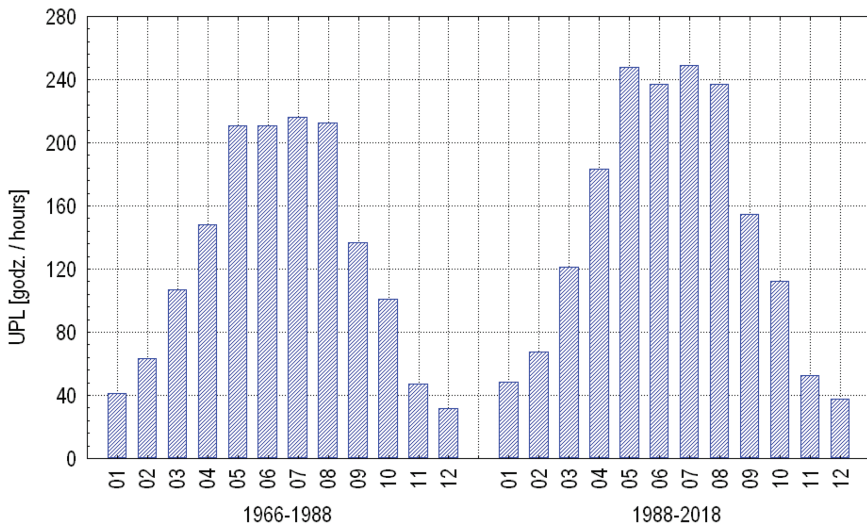
Porównanie średnich wartości usłonecznienia miesięcznego w obu okresach – 1966–1988 i 1988–2018 – wykazuje, że wzrost usłonecznienia zachodził nie tylko w miesiącach „długiego dnia”, ale również w pozostałych miesiącach, w których możliwości wzrostu ograniczone są przez czynnik astronomiczny (ryc. 3). Obliczone różnice między średnimi obszarowymi miesięcznymi wartościami UPL w obu okresach wskazują, że niezależnie od wartości i istotności trendu w całym okresie obserwacji we wszystkich miesiącach drugiego (1988–2018) okresu doszło do wzrostu usłonecznienia w stosunku do okresu pierwszego (1966–1988). Same wartości różnic, wobec występowania w drugim okresie silnego trendu, dają tylko bardzo przybliżoną informację o rzeczywistych rozmiarach wydłużenia się czasu operacji Słońca. Oszacowane różnice między miesięcznymi średnimi UPL w obu okresach

⁶Większość wartości trendów w tych miesiącach jest istotna na poziomie $p < 0,10$ (poziom ufności – 10%).



Ryc. 2. Przebieg sumy usłonecznienia (godziny) w okresie od kwietnia do sierpnia włącznie (średnia obszarowa; UPL_{04-08}). Oznaczony (pionowa linia przerywana) rok 1988. Widoczne skokowe przejście usłonecznienia na wyższy poziom (1987–1990) i pojawienie się dodatniego trendu w przebiegu

Fig. 2. Course of the sunshine duration sum (hours) in the period from April to August inclusive (area average; UPL_{04-08}). Year 1988 marked (vertical dashed line). Leap transition to a higher level of sunshine duration (1987–1990) and the appearance of a positive trend in the course visible



Ryc. 3. Średnie obszarowe miesięczne (01–12) wartości usłonecznienia (UPL; godziny) w pierwszym (1966–1988) i drugim (1988–2018) okresie

Fig. 3. Average monthly (01–12) area sunshine duration values (UPL; hours) in the first (1966–1988) and second (1988–2018) period

zestawiono w tab. 4. Różnica procentowa stanowi odsetek, o jaki wzrosło średnie miesięczne UPL w drugim okresie (1988–2018) w stosunku do pierwszego okresu przyjętego jako 100% (tab. 4).

Tab. 4. Różnice między średnimi wartościami usłonecznienia (UPL; godziny) w kolejnych miesiącach w pierwszym (1966–1988) i drugim okresie (1988–2018) oraz zmiana % średniego miesięcznego czasu usłonecznienia w drugim okresie w stosunku do okresu pierwszego

Table 4. Differences between the average values of sunshine duration (UPL; hours) in the following months in the first (1966–1988) and the second period (1988–2018) and the % change in the average monthly sunshine duration in the second period compared to the first period

Miesiąc / Month	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Godziny / Hours	6,8	4,0	14,1	34,8	36,4	26,1	32,7	24,0	18,2	11,1	5,5	5,8
% czasu % of the time	16,4	6,3	13,2	23,5	17,2	12,4	15,1	11,3	13,3	11,0	11,7	18,2

Największe bezwzględne wzrosty miesięcznego UPL w drugim okresie, przekraczające 20 godzin w miesiącu, nastąpiły w kwietniu, maju, czerwcu, lipcu i sierpniu (tab. 4), a więc w okresie „długiego dnia”. Wzrosty usłonecznienia mniejsze od 10 godzin (4,0–6,8) wystąpiły w listopadzie, grudniu, styczniu i lutym. Zwraca uwagę, że wzrost usłonecznienia w listopadzie, grudniu i styczniu stanowi w ujęciu względnym kilkunastoprocentowy (11,7–18,2) przyrost czasu operacji Słońca.

Porównując rozkłady wartości usłonecznienia w poszczególnych miesiącach (ryc. 4), można zauważyć, że w drugim okresie niemal we wszystkich miesiącach mediany podniosły się znacząco, podobnie jak i górne granice pierwszego i trzeciego kwartyla. Różnice między drugim a pierwszym okresem w pięciu kolejnych miesiącach (od kwietnia do sierpnia) są takiego rozmiaru, jak gdyby do każdego z tych miesięcy w drugim okresie dodano od 24 do 36 godzin operacji Słońca, co w przybliżeniu odpowiada usłonecznieniu grudnia z poprzedniego okresu (32 h).

Mając na względzie rozmiary wzrostu usłonecznienia oraz ich rozkład w funkcji czasu (ryc. 4), trzeba stwierdzić, że między pierwszym (1966–1988) a drugim okresem (1988–2018) doszło do radykalnej przebudowy reżimu usłonecznienia nad obszarem Polski. Przejście między reżimami było szybkie i trwało 2–3 lata, najwyraźniej zaznaczając się w okresie „długiego dnia”.

Problem przyczyn zmiany reżimu usłonecznienia

Usłonecznienie a cyrkulacja środkowotroposferyczna

Opisany wzrost usłonecznienia w latach 1966–2018 nad Polską nie stanowi cechy typowej wyłącznie dla obszaru Polski, lecz sygnalizowany jest, choć z różnym natężeniem, na znacznie większych obszarach – w Europie (Russak 1990; Stanhill 2005; Sanchez-Lorenzo i in. 2007, 2008; Kitsara i in. 2013) i USA (Stanhill, Cohen 2005) czy nawet w skali półkuli północnej (Wild i in. 2005, 2009; Wild 2014). Stwierdzona zmiana reżimu usłonecznienia nad Polską stawia problem przyczyn, które doprowadziły do jej zaistnienia.

Morawska-Horawska (2002) i Matuszko (2009, 2014) także Matuszko i Węglarczyk (2015) oraz Matuszko i Piotrowicz (2018) zwracają uwagę, że jedną z przyczyn obniżenia usłonecznienia w latach 50.–80. XX w. w Krakowie może być działanie czynnika antropogenicznego – wzrostu emisji gazowych i pyłowych zanieczyszczeń atmosfery spowodowanych nasileniem produkcji przemysłowej w regionie w latach 50.–80. XX w. Podobnego zdania jest, odnośnie do przyczyn zmian usłonecznienia w Łodzi, Podstawczyńska (2007a). Załamanie się w Polsce rozwoju przemysłowego z początkiem lat 90. XX w. stało się z kolei przyczyną zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery, co doprowadziło do zmian przezroczystości atmosfery i zachmurzenia, prowadzących do wzrostu usłonecznienia (Matuszko, Węglarczyk 2015; Matuszko, Piotrowicz 2018). Podobne wyjaśnienie wzrostu usłonecznienia i zwiększenia dopływu radiacji słonecznej na obszarze Europy i półkuli północnej od lat 90. XX w. w stosunku do okresu lat 50.–80. XX w. jest również popularne wśród klimatologów amerykańskich i zachodnioeuropejskich (np. Stanhill, Cohen 2001; Stanhill 2005; Wild i in. 2005; Sanchez-Lorenzo i in. 2008; Wild 2009, 2014). Takie wyjaśnienie przyczyn zmian usłonecznienia wydaje się być bardzo przekonujące i ugruntowane było już od czasów Raportu Rzymskiego (Meadows i in. 1972).

Antropogenicznego wpływu na długookresowe zmiany usłonecznienia nie można całkowicie odrzucić, ale oceniając zagadnienie z synoptycznego (meteorologicznego) punktu widzenia, nie wydaje się, aby rzeczywiście działalność ludzka była, lub mogła być, najważniejszym czynnikiem sterującym jednoczesnymi zmianami zachmurzenia czy usłonecznienia w skali hemisferycznej albo sektora cyrkulacyjnego. O ile wpływ przezroczystości atmosfery na natężenie promieniowania całkowitego Słońca i stosunek promieniowania bezpośredniego do rozproszonego jest oczywisty (Budyko 1956, 1974; Wild i in. 2005; Wild 2014), o tyle makroskalowy, względnie mało zróżnicowany w przestrzeni, sterujący wpływ zmiennej koncentracji aerozoli antropogenicznych na usłonecznienie (Wild 2014), wydaje się wątpliwy. Jest wątpliwy niezależnie od tego, że szeregi sum promieniowania całkowitego, zachmurzenia i usłonecznienia są ze sobą silnie skorelowane. Należy pamiętać, że w przypadku

natężenia promieniowania słonecznego mierzy się natężenie (a po scałkowaniu – sumy) dopływającej do czujnika energii, a w przypadku usłonecznienia sumę czasu tego dopływu, w którym natężenie dopływu promieniowania przekracza określoną wartość progową. Przezroczystość atmosfery, poza przypadkami skrajnymi, może wpływać jedynie na zmniejszenie czasu od momentu rozpoczęcia do zakończenia rejestracji usłonecznienia.

Podstawowym czynnikiem wprowadzającym zmienność w przebiegach niemal wszystkich elementów klimatycznych jest zmienność cyrkulacji atmosferycznej. Dotyczy to również usłonecznienia. W polskiej literaturze podejmowano wiele prób określenia wpływu cyrkulacji atmosferycznej na usłonecznienie (np. Matuszko 2009; Uscka-Kowalkowska i in. 2015; Urban i in. 2018) i zachmurzenie (np. Żmudzka 2007). Przetawione wyniki tych badań wykazują, że zmienność usłonecznienia jest powiązana ze zmiennością frekwencji niektórych sytuacji synoptycznych według klasyfikacji Lityńskiego (1969), Niedźwiedzia (1981) lub Großwetterlagen (Hess, Brezowsky 1952; Werner, Gerstengarbe 2010). Stwierdzono, że usłonecznienie miesięczne czy roczne rośnie wraz z częstością wystąpienia w tym samym czasie sytuacji antycyklonalnych, co jest równie zrozumiałe, jak i – z punktu widzenia mechanizmów kształtowania się warunków pogodowych – oczywiste.

Jeśli pominię się śledzenie etapów pośrednich zależności między cyrkulacją atmosferyczną a usłonecznieniem, można przeprowadzić analizę związków bezpośrednio między którąś z typologii cyrkulacji atmosferycznej a usłonecznieniem. Najprościej jest przeprowadzić taką analizę, badając związki z frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej Wangengejma-Girsa (Vangengejm 1952; Girs 1964, 1974), gdyż jej zmienność steruje zmiennością cyrkulacji dolnej i determinuje występowanie określonych typów sytuacji synoptycznych. Klasyfikacja ta wyróżnia w atlantycko-europejskim sektorze cyrkulacyjnym trzy typy makroprocesów (makrotypy) – W, strefowy zachodni, E – południkowy wschodni i C – południkowy.

Ponieważ cyrkulacja środkowotroposferyczna (500 hPa) steruje przebiegiem dolnych (SLP) procesów synoptycznych (Fortak 1971; Zverev 1977), niektóre klasyfikacje cyrkulacji dolnej są silnie, choć w specyficzny sposób, powiązane z wystąpieniem konkretnych makrotypów. Przykładowo, w przypadku frekwencji rocznej makrotypów W, E i C oraz takiej samej frekwencji typów cyrkulacji Osuchowskiej-Klein (1978, 1991), które można traktować, jako wzorce rozkładu pola SLP, związki między nimi kształtują się następująco⁷ (tab. 5).

⁷ Dane te należy traktować jako dużą próbę w sensie statystycznym. Okres 1901–1990 (90 lat) wybrano dla demonstracji charakteru zależności. Przeprowadzenie podobnej analizy dla okresu 1966–2018, czyli tego samego, w jakim bada się usłonecznienie nie jest możliwe, gdyż kalendarz typów cyrkulacji Osuchowskiej-Klein kończy się na 1990 r. Liczba miesięcy w roku, w których występują istotne korelacje dodatnie między frekwencją danego makrotypu a frekwencją typów cyrkulacji Osuchowskiej-Klein (w tym korelacji wysoce istotnych) świadczy o „sile” powiązania danego typu pola barycznego z danym makrotypem.

Tab. 5. Liczby miesięcy w roku, w których występują statystycznie istotne związki między frekwencją danego makrotypu cyrkulacji środkowotroposferycznej a frekwencją typu pola SLP (typu cyrkulacji Osuchowskiej-Klein 1978, 1991). Próba z lat 1901–1990

Table 5. Number of months in a year in which there are statistically significant relationships between the frequency of a given type of middle-tropospheric circulation and the frequency of the SLP field type (Osuchowska-Klein circulation 1978, 1991). Sample from 1901–1990

Makrotyp Macrotype	Typy cyrkulacji dolnej Osuchowskiej-Klein / Types of lower Osuchowska-Klein circulation												
	A	CB	D	B	F	C2D	D2C	G	E2C	E0	E	E1	BE
W	+11/5	+8/0	+5/0	-6/0	-2/0	+11/2	+6/2	*	-1/0	-9/1	-11/6	-6/2	-2/0
E	-9/0	-8/0	+1/0	+10/1	+6/1	-9/2	-4/0	-3/0	-9/1	+3/0	-1/0	+10/5	+6/1
C	-1/0	+2/0	-7/0	-7/0	-1/0	3/0	*	+2/0	+12/6	+3/0	+10/5	-4/0	-3/0

Objaśnienie: +X/y – przed kreską ułamkową: +X: liczba miesięcy w roku, w których zachodzą dodatnie, istotne statystycznie ($p < 0,05$) korelacje między danym makrotypem cyrkulacji Wangengejma-Girsa a danym typem cyrkulacji Osuchowskiej-Klein; y za kreską ułamkową – w tym korelacji wysoce istotnych ($p < 0,001$), -X – to samo, z korelacjami ujemnymi. Brak znaku przed ułamkiem oznacza, że znaki współczynników korelacji zmieniają się. * – brak istotnych statystycznie korelacji dodatnich lub ujemnych w jakimkolwiek miesiącu roku.

Explanation: +X/y – before the slash: +X: number of months in the year with positive, statistically significant ($p < 0.05$) correlations between a given Wangengejm-Girs circulation macro-type and a given type of Osuchowska-Klein circulation; y after a slash – including highly significant correlations ($p < 0.001$), -X – the same, with negative correlations. No sign in front of the fraction means that the signs of the correlation coefficients change. * – no statistically significant positive or negative correlations in any month of the year

Te typy cyrkulacji Osuchowskiej-Klein, których frekwencja z danym makrotypem powiązana jest dodatnio (+X, tab. 5), zwiększają swoją frekwencję wraz ze wzrostem frekwencji danego makrotypu. Ponieważ liczba dni w roku (sezonie, miesiącu) jest stała, wzrost frekwencji któregoś z typów cyrkulacji dolnej musi pociągać za sobą taki sam spadek frekwencji innego/innych typów cyrkulacji, co wymusza wystąpienie między nimi a danym makrotypem korelacji ujemnej (-X). I tak, można zauważyć, że na przykład w przypadku wzrostu frekwencji makrotypu W powinien w cyrkulacji dolnej wystąpić wzrost frekwencji typów A, C2D i D2C, przy jednoczesnym spadku frekwencji wszystkich innych typów cyrkulacji, niezwiązanych z danym makrotypem. Przedstawione związki niezbyt dobrze charakteryzują rzeczywiste zależności, gdyż postaci makrotypów i ich frekwencja wykazują odmiennosc w sezonie „ciepłym” i „chłodnym”, przez co i korelacje między makrotypami a typami cyrkulacji dolnej odmiennie kształtują się w obu, odmiennych pod względem termicznym, sezonach.

Typ cyrkulacji dolnej kształtuje w czasie jego występowania określoną pogodę nad danym obszarem. Pogodę, czyli „aktualny stan atmosfery”, opisany przez cały

Tab. 6. Współczynniki korelacji (r) między roczną frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej według klasyfikacji Wangengejma-Girsa a „obszarowym” usłoneczeniem rocznym (UPL_{RK}) i usłoneczeniem miesięcy „długiego dnia” (UPL_{04-08}) nad Polską. Okres analizy 1966–2018. Wartości r w górnej części wiersza, niżej – poziom istotności (p). Wartości $p = 0,000$ oznaczają, że $p \ll 0,001$

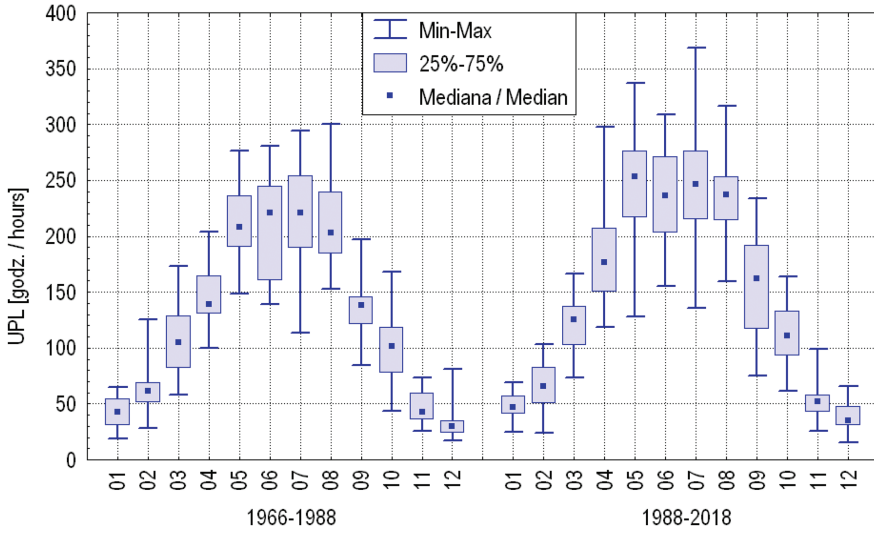
Table 6. Correlation coefficients (r) between the annual frequency of the macro-types of the mid-tropospheric circulation according to the Wangengejm-Girs classification and the area annual sunshine duration (UPL_{RK}) and sunshine duration of the months of the “long day” (UPL_{04-08}) over Poland. Analysis period 1966–2018. Values of r in the upper part of the line, lower - significance level (p). Values of $p = 0.000$ mean that $p \ll 0.001$

Makrotyp Macro-type	Statystyki Statistic	UPL_{RK}	UPL_{04-08}
W	r	0,66	0,66
	p	0,000	0,000
E	r	-0,65	-0,67
	p	0,000	0,000
C	r	0,16	0,21
	p	0,260	0,137

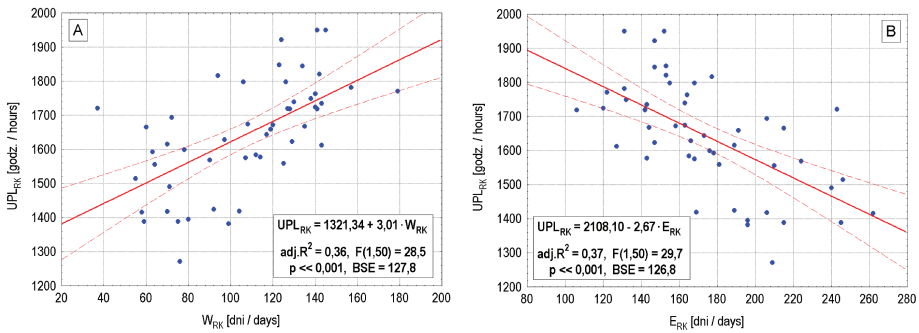
zespół współwystępujących elementów meteorologicznych, nie kształtuje zaś elementów klimatycznych. Dopiero po uśrednieniu wartości elementów opisujących przebieg pogody w danym okresie, na przykład uśrednieniu temperatury powietrza czy zliczeniu sumy godzin dobowej operacji Słońca w wartości miesięczne, uzyskuje się „element klimatyczny”, którego wartość w jakimś stopniu jest funkcją zarówno frekwencji określonych typów cyrkulacji dolnej, jak i sterującej nimi frekwencji makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej.

Analiza korelacji między roczną frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej a obszarowym usłoneczeniem rocznym i usłoneczeniem miesięcy „długiego dnia” (UPL_{RK} i UPL_{04-08}) została przedstawiona w tab. 6.

Rozkład wartości współczynników korelacji wskazuje, że usłoneczenie roczne jest stosunkowo silnie i wysoce istotnie powiązane z frekwencją makrotypów W oraz E, słabo i nieistotnie z frekwencją makrotypu C. Wzrost frekwencji makrotypu W pociąga za sobą wzrost usłoneczenia rocznego, wzrost frekwencji makrotypu E – jego spadek (ryc. 5). Zmiana frekwencji makrotypu W o 1 dzień w roku pociąga za sobą zmianę rocznego obszarowego usłoneczenia nad Polską o $2,97(\pm 0,56)$ godziny, zgodną ze znakiem zmiany frekwencji, ale jednocześnie wzrost frekwencji makrotypu W o 1 dzień w roku pociąga za sobą spadek o 1 dzień frekwencji makrotypu E lub makrotypu C. Wzrost frekwencji makrotypu E o 1 dzień w roku pociąga za sobą spadek usłoneczenia nad Polską o $2,42(\pm 0,55)$ godziny. Obie zależności



Ryc. 4. Zakresy zmienności usłonecznienia miesięcznego (UPL) w latach 1966–1988 (okres pierwszy) i 1988–2018 (okres drugi). Zwraca uwagę bardzo silna zmiana zakresów zmienności usłonecznienia w niektórych miesiącach (patrz np. marzec, kwiecień, maj, sierpień, wrzesień) Fig. 4. Ranges of monthly sunshine duration variability (UPL) in 1966–1988 (first period) and 1988–2018 (second period). There is a very strong change in the ranges of variability in sunshine duration in some months visible (see e.g. March, April, May, August, September)



Ryc. 5. Związek rocznej obszarowej sumy usłonecznienia nad Polską (UPL_{RK}) z roczną frekwencją makrotypu W (A) i makrotypu E (B). Rozrzuty punktów empirycznych stanowią na obu wykresach niemal dokładne „lustrzane odbicia”

Fig. 5. Relationship of the annual area sunshine duration over Poland (UPL_{RK}) with the annual frequency of the macro-type W (A) and macro-type E (B). The dispersions of empirical points are almost exact „mirror images” in both graphs.

są wysoce istotne ($p \ll 0,001$). Zmiana frekwencji makrotypu C o 1 dzień w roku pociąga za sobą zmianę usłonecznienia zgodną ze znakiem zmiany o $1,79(\pm 1,40)$ godziny. Ta ostatnia wartość, jak wynika z wielkości jej błędu standardowego (w nawiasie), jest nieistotna statystycznie ($p = 0,207$) i można traktować ją jako zerową. Można zatem w pierwszym przybliżeniu twierdzić, że w odróżnieniu od zmian rocznej frekwencji makrotypów W i E, z których każdy objaśnia nieco ponad 40% wariancji UPL_{RK} , zmiany frekwencji makrotypu C nie wpływają w jakiś bardziej istotny sposób na zmiany obszarowego usłonecznienia rocznego⁸.

Wartości współczynników korelacji między frekwencją makrotypów W i E a sumą roczną godzin usłonecznienia nad Polską (UPL_{RK}) i sumą godzin usłonecznienia w okresie od kwietnia do sierpnia włącznie, w której długość dnia we wszystkich dobach miesiący jest większa od 12 godzin (UPL_{04-08}), są praktycznie takie same (tab. 6).

Ponieważ wpływ zmian frekwencji makrotypów W i E na usłonecznienie jest przeciwny, działanie zmian frekwencji makrotypu W jest silniejsze niż frekwencji makrotypu E, dalej dla wyjaśnienia przyczyn zmian usłonecznienia nad Polską można skupić się na kwestii wpływu zmian rocznej frekwencji makrotypu W na usłonecznienia roczne.

Analiza wartości współczynników regresji funkcji $U_{RK} = a + b \cdot W_{RK}$ ujawnia, że zmiany frekwencji makrotypu W wywierają silny i wysoce istotny wpływ na rozmiar usłonecznienia nad Polską. Jednocześnie wpływ ten jest nad obszarem Polski zróżnicowany w przestrzeni. Wartości współczynników regresji dla 11 stacji, z których obliczano średnią UPL_{RK} , wraz z podaniem ich standardowego błędu oszacowania (BSE) i poziomem istotności statystycznej (p) zestawiono w tab. 7.

Jak wynika z zestawionych wartości współczynników regresji (tab. 7), zmiany frekwencji makrotypu W w ciągu roku najslabiej regulują usłonecznienie roczne na północy Polski – na wybrzeżu zachodnim wpływ ten jest jeszcze istotny, natomiast na północno-wschodnim krańcu (Suwałki) zmiany frekwencji tego makrotypu nie pociągają za sobą statystycznie istotnej reakcji usłonecznienia. Można jednak przypuszczać, na podstawie spostrzeżeń Gorczyńskiego (1952) i Kuczarskiego (1990), że na wybrzeżu środkowym i w rejonie Zatoki Gdańskiej wpływ ten może być znacznie silniejszy⁹. Na pozostałym obszarze Polski wpływ ten wszędzie jest wysoce istotny, dość silny (zmiana frekwencji makrotypu W o 1 dzień w roku pociąga za sobą odpowiednią zmianę usłonecznienia rocznego o 2 i więcej godziny), choć zmiany

⁸ Co nie oznacza, że zmiany frekwencji tego makrotypu nie wywierają istotnego wpływu na zmienność usłonecznienia na obszarze całej Polski.

⁹ Niepełne dane ze stacji Hel, których nie wykorzystano w opracowaniu ze względu na liczne braki w obserwacjach w latach 1980–1990, również wskazują, że wniosków o słabym wpływie zmian frekwencji makrotypu W na usłonecznienie roczne na północy Polski nie można generalizować i rozszerzać ich na całą północną Polskę.

Tab. 7. Wartości współczynników regresji określających rozmiar wpływu zmian frekwencji rocznej makrotypu cyrkulacji środkowotroposferycznej W według klasyfikacji Wangengejma-Girsa (1 dzień w roku) na zmianę rocznego usłonecznienia (godz.·rok⁻¹) na wybranych stacjach i w Polsce (UPL_{RK}). Podana istotność (p) współczynnika regresji i wartość błędu standardowego estymacji (BSE) usłonecznienia rocznego na danej stacji przy przyjęciu podanego współczynnika regresji. Okres 1966–2018

Table 7. Values of regression coefficients determining the size of the impact of changes in the annual frequency of the mid-tropospheric circulation of macro-type W according to the Wangengejm-Girs classification (1 day a year) on the change in annual sunshine duration (hours·year⁻¹) at selected stations and in Poland (UPL_{RK}). The given significance (p) of the regression coefficient and the value of the standard error of estimation (SEE) of annual sunshine duration at a given station, assuming the given regression coefficient. Period 1966–2018

Stacja Station	Współczynnik regresji (błąd standardowy oszacowania w nawiasach) Regression coefficient (standard error of estimate in parentheses)	Poziom istotności Significance level p	BSE SEE
Kołobrzeg	1,40(±0,65)	0,037	149,85
Suwałki	1,19(±0,60)	0,056	138,89
Szczecin	2,90(±0,64)	<< 0,001	149,90
Chojnice	3,06(±0,71)	<< 0,001	163,56
Białystok	2,71(±0,64)	<< 0,001	146,63
Poznań	4,55(±0,65)	<< 0,001	148,06
Łódź	2,51(±0,65)	<< 0,001	150,47
Włodawa	2,20(±0,53)	<< 0,001	122,10
J. Góra	4,12(±0,76)	<< 0,001	172,85
Katowice	4,72(±0,73)	<< 0,001	166,46
Lesko	3,37(±0,67)	<< 0,001	152,70
UPL_{RK}	2,97(±0,55)	<< 0,001	127,19

frekwencji makrotypu W wywierają na zmiany rocznego usłonecznienia wyraźnie silniejszy (~1,5 raza) wpływ na obszarze zachodniej i południowo-zachodniej Polski niż na pozostałym obszarze kraju. Zmiany w przestrzeni siły związku między frekwencją makrotypu W a usłonecznieniem (porównaj tab. 7 z tab. 1) wyjaśniają niemal całkowicie rozkład przestrzenny trendów usłonecznienia rocznego nad Polską, gdyż wartości trendów są ściśle powiązane z wartością współczynników regresji z tab. 7 (r Spearmana równe 0,96, p << 0,001). Wskazuje to jednoznacznie, że przyczyną wzrostu usłonecznienia są zmiany cyrkulacji środkowotroposferycznej, przejawiające się w latach 1966–2018 we wzroście frekwencji makrotypu W i jednocześnie spadku frekwencji makrotypu E.

Mechanizm wpływu zmian frekwencji makrotypów W i E na usłonecznienie jest stosunkowo prosty. Wraz ze wzrostem frekwencji makrotypu W rośnie również (tab. 5) frekwencja pól SLP podobnych do typów cyrkulacji C2D oraz D2C według klasyfikacji Osuchowskiej-Klein (1978, 1991). Przejawia się to w dolnym polu barycznym jako przesunięcie centrum Wyżu Azorskiego na E i NE, niekiedy nawet nad SW Europę i/lub zachodnią część Morza Śródziemnego i wykształcenie się klina tego wyżu sięgającego daleko na wschód nad Europę, do 25–35°E. Oba te typy sytuacji barycznej kierują nad Europę Środkową ciepłe powietrze morskie znad Atlantyku. Powietrze to w trakcie drogi nad lądowymi obszarami Europy transformuje się powoli w powietrze kontynentalne, a po krótkim zaleganiu wiosną, latem czy na początku jesieni nad Europą Środkową, w tym i nad Polską, całkowicie transformuje się w suche i ciepłe powietrze polarne kontynentalne. W efekcie tych procesów, wraz ze wzrostem frekwencji obu tych typów sytuacji synoptycznych, rośnie nad Polską częstość występowania pogód o niewielkim zachmurzeniu w piętrze niskim i średnim, bez opadów (mogą wystąpić jedynie krótkotrwałe opady konwekcyjne), o słabych wiatrach z kierunków zmiennych lub ciszach oraz o wyższej niż przeciętna w danej porze roku, temperaturze powietrza. Tego rodzaju raczej sucha i ciepła pogoda o umiarkowanej konwekcji nie sprzyja ograniczeniu zawartości w powietrzu zanieczyszczeń pyłowych.

Można więc interpretować wzrost usłonecznienia po roku 1987 jako efekt zmiany struktury zachmurzenia, nie zaś zmiany przezroczystości powietrza. Zmiana struktury pogód, pociągająca za sobą zmiany struktury zachmurzenia i zmianę reżimu usłonecznienia, jest sterowana przez zmienność makrocyrkulacji środkowotroposferycznej.

Długookresowa zmienność makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej a składowa długookresowa zmian usłonecznienia nad Polską

Zmiana reżimu usłonecznienia nad Polską nastąpiła w bardzo krótkim, 2-, 3-letnim okresie. Jeśli zmianami reżimu usłonecznienia rzeczywiście steruje cyrkulacja środkowotroposferyczna, podobnie szybkie zmiany powinny zajść również w jej przebiegu.

Przebieg frekwencji makrotypów W, E i C i kształtowanie się ich struktury ilościowej w kolejnych latach stanowią podstawę do wyróżniania tak zwanych „epok cyrkulacyjnych” (Girs 1974), w których utrzymuje się przez kilkanaście lub więcej lat względnie charakterystyczna struktura frekwencji makrotypów (proporcji między roczną frekwencją poszczególnych makrotypów), ale różna od struktury w poprzednim i następnym okresie. Savichev i in. (2015) po roku 1948 wyróżniają epoki E+C (1949–1965), E (1966–1989), a następnie w latach 1990–2014 epokę cyrkulacyjną W¹⁰. W polskiej literaturze klimatologicznej przegląd wcześniej wyróżnionych przez

¹⁰ Podany rok (2014) nie oznacza, że epoka cyrkulacyjna W skończyła się z tą datą. Ograniczenie to wynika z tego, że cytowani autorzy (Savichev i in., 2015) analizowali szereg danych do tego roku.

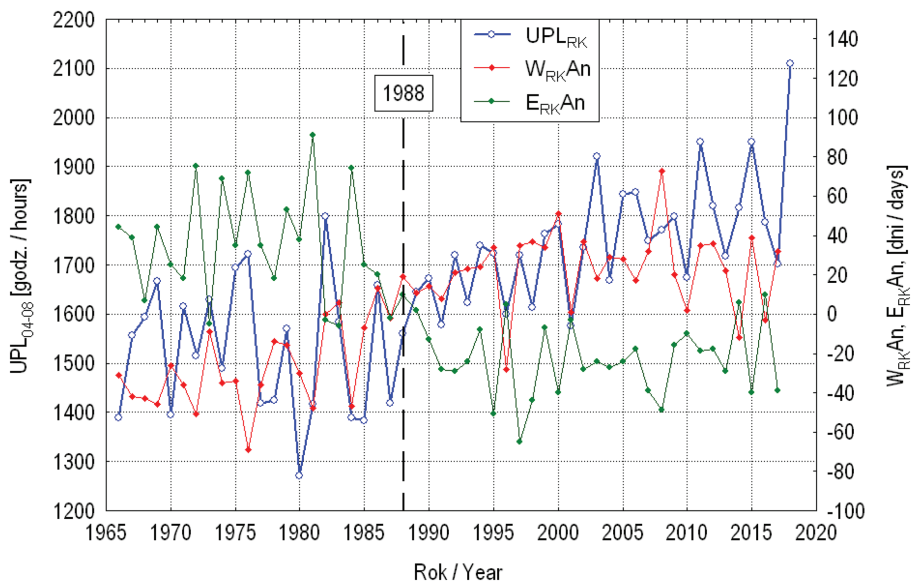
badaczy radzieckich epok cyrkulacyjnych dają Degirmendżić i in. (2000), a także własne wydzielenia epok cyrkulacyjnych Degirmendżić i Kożuchowski (2017, 2019) oraz Kożuchowski i Degirmendżić (2018).

Rozpatrywany okres zmian usłonecznienia nad Polską zawiera się między latami 1966 a 2018. Według podziału Savicheva i in. (2015) okres ten mieści się w epoce cyrkulacyjnej E (1966–1989) i epoce cyrkulacyjnej W (1990–...). Według analizy autorów tej pracy, granicę między tymi epokami należy przesunąć na 1988 r. Niezależnie od ewentualnych drobnych, rzędu 1–2 lat, przesunięć tej granicy (np. Degirmendżić i Kożuchowski 2017) właśnie na lata graniczne między epoką E a epoką W przypada „skok” usłonecznienia w okresie „długiego dnia” (04–08) i zmiana reżimu usłonecznienia nad Polską (tab. 2, ryc. 2, 3 i 4).

Żmudzka (2004, 2007), przeprowadzając grupowanie kolejnych lat 1951–2000 we względnie jednorodne okresy pod względem rocznej amplitudy zachmurzenia nad Polską i średniej różnicy między zachmurzeniem jesieni i wiosny, wykryła zasadniczą granicę między dwoma jednostkami taksonomicznymi zachmurzenia (Żmudzka 2007; ryc. 172 B) lokującą się między 1985 r. a 1986 r. Lata 1986–2000 tworzą wyraźną, indywidualną pod względem wykształcenia cech grupowania jednostkę, bardzo silnie różniącą się od zbioru lat wcześniejszych. Żmudzka (2004, 2007) interpretuje granicę między tymi dwoma różnymi okresami zachmurzenia jako przejaw zmiany reżimu zachmurzenia zachodzącego pod wpływem zmiany warunków makrocyrkulacyjnych. Tak więc również zachmurzenie nad Polską, które stanowi podstawową przyczynę zmian usłonecznienia, zmienia swój reżim w tym samym, w przybliżeniu, momencie, w jakim dochodzi do zmiany epoki cyrkulacyjnej. Przebieg anomalii rocznej frekwencji makrotypów W i E oraz wartości obszarowego usłonecznienia rocznego (UPL_{RK}) przedstawia ryc. 6.

Rycina 6 ilustruje bardzo silny spadek frekwencji anomalii rocznych makrotypu E i podobnie szybki wzrost frekwencji makrotypu W od 1984 r. W 1988 r. obie frekwencje makrotypów stają się bardzo bliskie średnim wieloletnim (W – 106 dni, E – 171 dni w roku). Od 1989 r. roczna frekwencja makrotypu W staje się wyższa od normy średniej wieloletniej z lat 1951–2015, a roczna frekwencja makrotypu E staje się równa normie wieloletniej. Zmienia się epoka cyrkulacyjna. W następnych latach utrzymuje się wzrost frekwencji makrotypu W i spadek frekwencji makrotypu E, a następnie cechy struktury frekwencji makrotypów (frekwencja makrotypu W w ciągu roku jest wyższa, a frekwencja makrotypu E jest niższa od normy wieloletniej) zostają utrwalone.

Od momentu zmiany epoki cyrkulacyjnej (1988–1989) zmienia się, w przybliżeniu zgodnie ze zmianami frekwencji makrotypu W, charakter przebiegu zmiennej UPL_{RK} , a w szeregu obszarowego usłonecznienia rocznego pojawia się trend dodatni, wstępnie zgodny ze wzrostem frekwencji makrotypu W i spadkiem frekwencji makrotypu E (ryc. 6).



Ryc. 6. Przebieg anomalii rocznej frekwencji makrotypów W ($W_{RK}An$) i E ($E_{RK}An$) i obszarowej rocznej sumy usłonecznienia nad Polską (UPL_{RK}). Anomalie frekwencji makrotypów liczone względem średnich z okresu 1951–2015. Oznaczono (linia pionowa) rok 1988, przejścia epoki cyrkulacyjnej E w epokę cyrkulacyjną W

Fig. 6. Course of anomalies in the annual frequency of the macro-types W ($W_{RK}An$) and E ($E_{RK}An$) and the area annual sum of sunshine duration over Poland (UPL_{RK}). Anomalies of the frequency of macro-types compared to the means for the period 1951–2015. The year 1988, the transition of the E circulation era into the W circulation era, is marked (vertical line).

Taki obraz przebiegów wskazuje, że zmiana trendów usłonecznienia rocznego nad Polską nastąpiła wraz ze zmianą epoki cyrkulacyjnej. Dowodzi to wprost, że długookresowymi zmianami usłonecznienia rocznego oraz usłonecznienia w okresie „długiego dnia” (UPL_{04-08}) sterują długookresowe zmiany warunków makrocyrkulacyjnych.

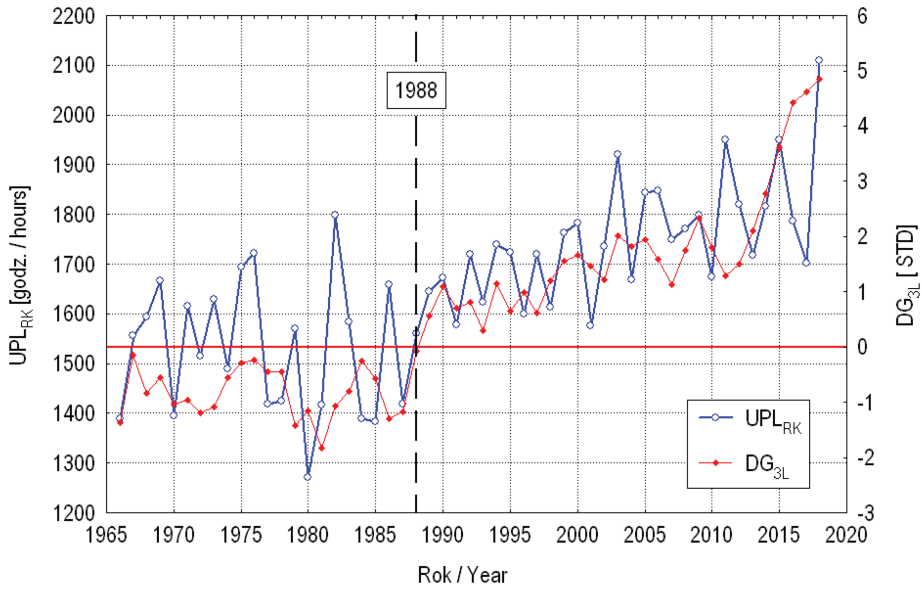
Usłonecznienie nad Polską a cyrkulacja termohalinowa Atlantyku Północnego

Jeśli zmiany cyrkulacji środkowotroposferycznej są przyczyną zmian usłonecznienia, to natychmiast pojawia się kolejny problem – co steruje zmiennością i zmianami środkowotroposferycznych procesów makrocyrkulacyjnych. Czynnikiem, który steruje zmianami frekwencji makrotypów W oraz E, stanowi pierwotną przyczyną zmian usłonecznienia.

Frekwencją makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej W i E sterują zmiany rozkładu przestrzennego zasobów ciepła w wodach Atlantyku Północnego (Marsz 2005, 2012). Dzieje się to poprzez działanie zróżnicowanych pod względem natężenia i czasu działania strumieni ciepła z oceanu do atmosfery z poszczególnych akwenów tej części oceanu. Stanowią one o kształtowaniu się w przestrzeni i czasie poziomych (południkowych) gradientów temperatury na powierzchni izobarycznej 500 hPa, które w sposób powtarzalny działają stabilizująco lub modyfikująco na procesy ewolucji fal długich (fal Rossby’ego; Fortak 1971; Zverev 1977).

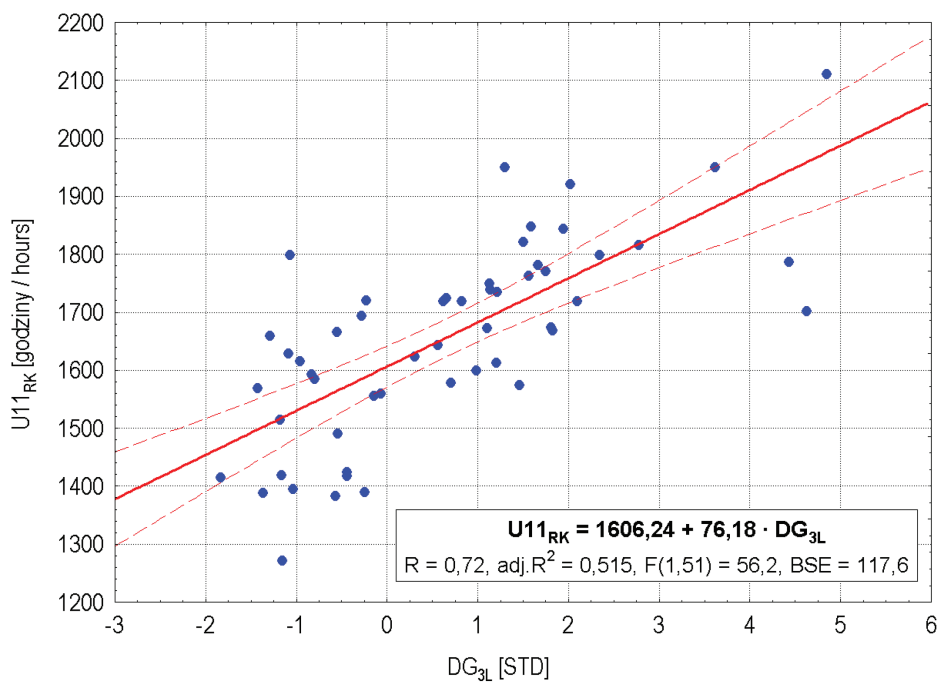
Wielkoskalowe zmiany rozkładu zasobów ciepła w wodach Atlantyku Północnego następują przede wszystkim pod wpływem zmian intensywności cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku Północnym (dalej NA THC). Wskaźnik intensywności NA THC oznaczony akronimem DG_{3L} jest dość silnie i wysoce istotnie statystycznie powiązany z frekwencją makrotypów W i E Wangengejma-Girsa. Rozdzielczość czasowa tego wskaźnika jest roczna.

Współczynniki korelacji między roczną frekwencją makrotypów W i E a wskaźnikiem DG_{3L} są równe 0,61 i -0,62 odpowiednio (oba $p \ll 0,001$; lata 1966–2018). Ponieważ zachodzą związki wskaźnika DG_{3L} z frekwencją makrotypu W, wskaźnik DG_{3L} jest również skorelowany dodatnio z roczną frekwencją makrotypów C2D i D2C Osuchowskiej-Klein ($r = 0,56$ ($p \ll 0,001$) i 0,41 ($p < 0,009$) odpowiednio; okres 1951–1990). W ten sposób NA THC, poprzez sterowanie procesami makrocyrkulacyjnymi i cyrkulacją dolną, steruje również zmiennością usłonecznienia nad obszarem Polski. W badanym okresie korelacja między przebiegami wskaźnika DG_{3L} a rocznym usłonecznieniem nad Polską (UPL_{RK}) jest silna ($r = 0,72$) i wysoce istotna ($p \ll 0,001$). Przebieg obu zmiennych przedstawia ryc. 7, a wykres rozrzutu punktów w przestrzeni wspólnej DG_{3L} & UPL_{RK} ryc. 8.



Ryc. 7. Przebieg wartości obszarowego usłonecznienia rocznego (UPL_{RK}) i wskaźnika DG_{3L} . Oznaczono (czerwona linia pozioma) zerową wartość wskaźnika DG_{3L} , która oddziela ujemną fazę NA THC od fazy dodatniej. Oznaczony (pionowa linia przerywana) rok 1988

Fig. 7. Course of the value of the annual area sunshine duration (UPL_{RK}) and the DG_{3L} index. The zero value of the DG_{3L} index, which separates the negative NA THC phase from the positive phase, is marked (horizontal red line) Year 1988 marked (vertical dashed line).



Ryc. 8. Zmienność rocznego obszarowego usłonecznienia w Polsce (UPL_{RK}) jako funkcja zmian wskaźnika DG_{3L} (lata 1966–2018)

Fig. 8. Variability of the annual area sunshine duration in Poland (UPL_{RK}) as a function of changes in the DG_{3L} index (1966–2018)

Związki między wskaźnikiem DG_{3L} a usłoneczeniem rocznym są nieco silniejsze niż związki między frekwencją makrotypów W i E z usłoneczeniem. Na wszystkich polskich stacjach znak tych związków jest dodatni, co oznacza, że wraz ze wzrostem intensywności NA THC rośnie na obszarze Polski usłoneczenie roczne. Z wyjątkiem Suwałk ($r = 0,29$, $p = 0,033$), związki wskaźnika DG_{3L} z rocznym usłoneczeniem są wysoce istotne. Najsilniej skorelowane ze wskaźnikiem DG_{3L} jest usłoneczenie roczne w Opolu ($r = 0,81$), Jeleniej Górze ($r = 0,79$), Katowicach ($r = 0,75$), Poznaniu ($r = 0,71$) i Lesku ($r = 0,70$), najslabiej w Suwałkach, Włodawie ($r = 0,52$) i Mikołajkach ($r = 0,53$).

W latach 1966–2018 zmienność wskaźnika DG_{3L} objaśnia 51% wariacji rocznego obszarowego usłoneczenia nad Polską (UPL_{RK}). Zmiana wartości wskaźnika DG_{3L} o jedną jednostkę pociąga za sobą, zgodną ze znakiem, zmianę UPL_{RK} o około 76 godzin (ryc. 8). Ponieważ historyczne (1880–2018) wartości wskaźnika mieszczą się w przedziale od około $-1,9$ do około $+4,8$, zmiany DG_{3L} mogą regulować usłoneczenie roczne w granicach około 500 godzin. Przy średnim rocznym usłoneczeniu w dekadzie 1951–1960 stacji położonej blisko geometrycznego „środku Polski” (w Łodzi), równym 1503 godziny (Podstawczyńska 2007a, b) czy 1550 godzin w Krakowie w latach 1884–2014 (Matuszko, Węglarczyk 2015), daje to zakres regulacji równy w przybliżeniu 1/3 wartości średniego rocznego usłoneczenia na tych stacjach.

Specyficznym kształtem się rozkład związków między wskaźnikiem DG_{3L} a usłoneczeniem miesięcznym na poszczególnych stacjach. Mimo, że wskaźnik DG_{3L} ma taką samą wartość w ciągu roku, siła związków wskaźnika i usłoneczenia w poszczególnych miesiącach wyraźnie się różnicuje w czasie i przestrzeni (tab. 8). Jedyną stacją, na której związki usłoneczenia ze wskaźnikiem DG_{3L} pod względem ich siły mocno odbiegają od związków na pozostałych polskich stacjach, są Suwałki (tab. 8).

Można sądzić, że przyczyną tego zróżnicowania jest przede wszystkim zmienna długość dnia, określająca potencjalny czas operacji Słońca. Jest ona w miesiącach zimowych zbyt mała, aby zwiększona częstość, trwających przez całą dobę warunków pogodowych sprzyjających wzrostowi usłoneczenia, mogła dać wystarczająco duże i regularne jego wzrosty. Na stacjach w północnej i wschodniej Polsce, gdzie w miesiącach zimowych występują słabe korelacje ujemne, przypuszczalnie działają również i inne czynniki, jak na przykład ochładzanie napływającego z zachodu powietrza morskowego w kontakcie z chłodniejszym podłożem, z częstszym występowaniem zamglenia i mgieł oraz z niskim zachmurzeniem warstwowym. Można również dopatrywać się w tym zróżnicowaniu wpływu czynników lokalnych (orograficznych; Jelenia Góra z 11 miesiącami istotnych korelacji), które mogą wzmacniać działanie cyrkulacji dolnej (sterowanej przez NA THC) w kształtowaniu zmienności usłoneczenia. Bardziej stanowczo na temat rzeczywistych przyczyn tego zróżnicowania siły związków będzie można wypowiadać się po przeprowadzeniu bardziej szczegółowych badań.

Tab. 8. Współczynniki korelacji między miesięcznym i rocznym usłonecznieniem na wybranych stacjach oraz miesięcznym i rocznym średnim obszarowym usłonecznieniem nad Polską (UPL) a wskaźnikiem DG_{3L} (1966–2018). Wartości istotne na poziomie 0,05 pogrubiono

Table 8. Coefficients of correlation between the monthly and annual sunshine duration at selected stations and the monthly and annual mean area sunshine duration over Poland (UPL) and the DG_{3L} index (1966–2018). Values significant at the 0.05 level in bold

Stacja Station	Miesiące / Months												Rok Year
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Kołobrzeg	0,17	0,28	0,35	0,40	0,33	0,30	0,25	0,17	0,43	0,04	0,19	-0,12	0,64*
Suwałki	-0,07	-0,19	0,03	0,29	0,29	0,09	0,08	0,11	0,30	0,08	-0,19	-0,11	0,29
Szczecin	0,28	0,33	0,33	0,46*	0,29	0,23	0,24	0,28	0,46*	0,22	0,25	0,20	0,67*
Chojnice	0,14	0,28	0,25	0,45*	0,39	0,24	0,20	0,27	0,48*	0,25	0,23	0,12	0,65*
Białystok	-0,03	-0,05	0,12	0,43*	0,45*	0,35	0,20	0,32	0,27	0,15	0,04	0,13	0,59*
Poznań	0,26	0,24	0,21	0,52*	0,33	0,40	0,38	0,51*	0,40	0,16	0,23	0,10	0,71*
Łódź	0,18	0,12	0,22	0,41	0,30	0,28	0,21	0,33	0,34	0,11	0,24	0,21	0,61*
Włodawa	-0,11	-0,11	0,05	0,31	0,33	0,36	0,16	0,28	0,19	0,16	0,09	0,04	0,52*
J. Góra	0,27	0,29	0,38	0,52*	0,43*	0,53*	0,54*	0,60*	0,35	0,10	0,38	0,36	0,79*
Katowice	0,32	0,13	0,40	0,43*	0,35	0,42	0,44*	0,59*	0,43*	0,18	0,41	0,24	0,75*
Lesko	0,10	0,04	0,10	0,57*	0,35	0,46*	0,38	0,52*	0,29	0,08	0,30	0,17	0,70*
UPL	0,19	0,15	0,25	0,50*	0,40	0,39	0,31	0,42	0,40	0,16	0,28	0,18	0,72*

Zwraca uwagę to, że rozkład najsilniejszych i istotnych współczynników korelacji między wskaźnikiem DG_{3L} a usłonecznieniem miesięcznym (tab. 8) w zasadniczym stopniu odpowiada najsilniejszym i statystycznie istotnym trendom usłonecznienia miesięcznego zestawionym w tab. 3.

W ostatnich latach (2010–2018) w szeregu rocznego obszarowego usłonecznienia odnotowuje się wyjątkowo duże wartości, zbliżające się do lub przekraczające 1900 godzin (lata 2011, 2015, 2018; ryc. 7). Są to wartości wykraczające *in plus* w stosunku do średniej z całego rozpatrywanego okresu 1966–2018 poza granice $1,5\sigma$ (odchylenia standardowego). Nietrudno zauważyć, że wzrost ten może być związany ze wzrostem intensywności NA THC (ryc. 7). Z kolei wystąpienie w 2018 r. na niemal wszystkich polskich stacjach anomalnie wysokiego ($\sigma = +2,69$) usłonecznienia rocznego, przekraczającego 2000 godzin (np. Wrocław – 2329,2, Poznań – 2224,8, Kołobrzeg – 2292,9, Chojnice – 2161,3, Włodawa – 2011,3 godziny) wyjaśnia również anomalna wartość wskaźnika DG_{3L} (+4,845) w tym roku.

Przedstawiony przebieg (ryc. 7) wykazuje również, że występujący dodatni trend w szeregu wskaźnika DG_{3L} po 1988 r. pociąga za sobą jednoczesne pojawienie się dodatniego trendu w przebiegu usłonecznienia rocznego. Skokowemu wzrostowi usłonecznienia nad Polską, który nastąpił synchronicznie ze zmianą epok cyrkula-

cyjnych (lata 1987–1989), odpowiada w przebiegu wskaźnika DG_{3L} równie skokowe przejście, w której NA THC przeszła z fazy ujemnej, niższej od przeciętnego jej natężenia w okresie 1901–2000, do fazy dodatniej, w której intensywność cyrkulacji termohalinowej wzrosła trwale do wartości wyższych od przeciętnych.

Dyskusja i wnioski

Jest oczywiste, że bezpośredniego związku między ilością ciepła, przenieszonego przez THC wraz z wodami na północ, a usłoneczeniem być nie może. Jednak związki, jakie zachodzą między kolejnymi procesami, sterowanymi przez zmienność NA THC w atlantycko-eurazjatyckim sektorze cyrkulacyjnym (NA THC → rozkład przestrzenny zasobów ciepła w wodach N Atlantyku → cyrkulacja środkowotroposferyczna → cyrkulacja dolna → struktura pogód → wartości elementów meteorologicznych), są na tyle silne, że po przetworzeniu elementów meteorologicznych z jakiegoś okresu w elementy klimatyczne wykrywa się bezpośrednie związki między zmiennością wskaźnika DG_{3L} , charakteryzującego intensywność NA THC (przyczyna), a ostatecznym skutkiem, jakim jest zmienność usłoneczenia lub temperatury powietrza nad Polską (Marsz 2015a). Ponieważ NA THC reguluje rozkład przestrzenny zasobów ciepła na Atlantyku Północnym, a przez to i temperaturę powierzchni oceanu (SST) na poszczególnych akwenach, powinny zachodzić również bezpośrednie związki między SST na Atlantyku Północnym a usłoneczeniem nad obszarem Polski. Wyjaśnienie tego ostatniego zagadnienia wymaga odrębnych badań.

Objaśnienie przez zmienność wskaźnika DG_{3L} połowy wariancji rocznego usłoneczenia obszarowego (ryc. 8) oraz skala regulacji usłoneczenia rocznego przez NA THC sięgająca 1/3 liczby godzin średniego usłoneczenia rocznego, pozwala twierdzić, że zmienność cyrkulacji termohalinowej jest najważniejszym czynnikiem regulującym zmienność usłoneczenia. Poprzez ten długi łańcuch procesów cyrkulacja termohalinowa na Atlantyku Północnym wywiera wpływ na ilość dopływającej energii słonecznej do powierzchni, na oddalonym od oceanu obszarze.

Długookresowe zmiany usłoneczenia nawiązują wyraźnie do periodyzacji długookresowych procesów makrocyrkulacyjnych – epok cyrkulacyjnych – w których struktura frekwencji poszczególnych makrotypów utrzymuje się w pewnych względnie stałych proporcjach. W rozpatrywanym ostatnim pięćdziesięcioleciu wzrost intensywności NA THC, poprzez zwiększenie frekwencji makrotypu cyrkulacji strefowej W i zmniejszenie frekwencji południkowego makrotypu E oraz zwiększenie częstości występowania „antycyklonalnych” postaci cyrkulacji dolnej, doprowadził do silnego wzrostu usłoneczenia nad obszarem Polski. Można sądzić, że ze względu na wielką skalę przestrzenną omawianych oddziaływań makrocyrkulacyjnych

opisywany w literaturze przedmiotu wzrost usłonecznienia nad Europą ma taką samą genezę. W świetle powyższego, rola czynnika antropogenicznego w kształtowaniu zmian usłonecznienia, poza być może jakimiś osobliwościami lokalnymi, wydaje się drugorzędna, lub być może nawet marginalna.

Cyrkulacja termohalinowa jest ze swojej natury niestabilna, co przejawia się w jej przebiegu występowaniem zmienności międzyrocznej i długookresowej. Zmienność natężenia NA THC, jak wykazują dotychczasowe wyniki badań, stanowi przejaw deterministycznej, wewnętrznej zmienności systemu klimatycznego (np. Delworth, Knutson 2000; Andronova, Schlesinger 2000; Meincke i in. 2003; Knight i in. 2005; ...) i nie jest wymuszana przez działanie czynników zewnętrznych. W jej przebiegu stwierdzono w latach 1880–2000 występowanie silnej okresowości około 65–70-letniej (Schlesinger, Ramankutty 1994) czy 70-letniej (Knight i in. 2005). Można przypuszczać, że podobną okresowość wykryje się i w przebiegu usłonecznienia.

Mając na względzie opisane procesy regulujące zmiany usłonecznienia nad Polską, można twierdzić, że obserwowany obecnie silny wzrost usłonecznienia oraz stwierdzona zmiana jego reżimu w latach 1987–1989 mają, zdaniem autorów, przyczyny naturalne i stanowią przykład działania jednego z procesów wewnętrznej dynamiki systemu klimatycznego.

Literatura

- Andronova N.G., Schlesinger M.E., 2000, *Causes of Global Temperature Changes During the 19th and 20th Centuries*, Geophysical Research Letters, 27 (14), 2137–2140.
- Bartoszek K., Matuszko D., Węglarczyk S., 2020, *Trends in sunshine duration in Poland (1971–2018)*, International Journal of Climatology, 41 (1), 73–91.
- Budyko M.I., 1956, *Teplovoj balans zemnoj poverkhnosti*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Budyko M.I., 1974, *Izmeneniya klimata*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Degirmendžić J., 2004, *Zmiany usłonecznienia w Polsce i ich uwarunkowania cyrkulacyjne*, [w:] K. Kozuchowski (red.), *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Wydawnictwo Biblioteka, Łódź, 9–23.
- Degirmendžić J., Kozuchowski K., Wibig J., 2000, *Epoki cyrkulacyjne w XX wieku i zmienność typów cyrkulacji w Polsce*, Przegląd Geofizyczny, 45 (3–4), 221–239.
- Degirmendžić J., Kozuchowski K., 2017, *Epoki cyrkulacyjne w okresie 1891–2010 na podstawie klasyfikacji Wangenheima-Girsa*, [w:] *Materiały Konferencji Jubileuszowej z okazji 70-lecia Polskiego Towarzystwa Geofizycznego*, 25–26.09.2017, Łódź, 72–73.
- Degirmendžić J., Kozuchowski K., 2019, *Variation of macro-circulation form over the Atlantic-Eurasian temperate zone according to the Vangengeim-Girs classification*, International Journal of Climatology, 39 (13), 4938–4952.
- Delworth T.L., Knutson T.R., 2000, *Simulation of early 20th Century global warming*, Science, 287 (5461), 2246–2250.

- Dimitriev A.A., Belyazo V.A., 2006, *Kosmos, planetarnaya klimaticheskaya izmenchivost' i atmosfera polyarnykh regionov*, Gidrometeoizdat, St. Peterburg.
- Fortak H., 1971, *Meteorologie*, Deutsche Buch-Gemeinschaft, Berlin, Darmstadt, Wien.
- Girs A.A., 1964, *O sozdanii jedinoj klassifikacii makrosinopticheskikh processov severnogo polushariya*, Meteorologiya i Gidrologiya, 4, 43–47.
- Girs A.A., 1974, *Makrocirkulacionnyj metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov*, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Gorczyński W., 1952, *Usłonecznienie polskich wybrzeży Bałtyku na tle ogólnym Europy i przyległych mórz*, Księga Pamiątkowa 75. lecia Towarzystwa Naukowego w Toruniu, Toruń, 93–106.
- Górski T., Górska K., 2000, *Usłonecznienie w Puławach w ciągu lat 1923–1992*, Acta Universitatis Nicolai Copernici, Geografia, 31, 129–144.
- Hess P., Brezowsky H., 1952, *Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdiensts in der US-Zone*, 33, Bad Kissingen.
- Kitsara G., Papaioannou G., Papathanasiou A., Retalis A., 2013, *Dimming/brightening in Athens: Trend in sunshine duration, cloud cover and reference evapotranspiration*. Water Resources Management, 27 (6), 1623–1633.
- Knight J.R., Allan R.J., Folland C.K., Vellinga M., Mann M.E., 2005, *A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate*, Geophysical Research Letters, 32, L20708.
- Kożuchowski K., Degirmendžić J., 2018, *Zmienność form cyrkulacji środkowo-troposferycznej według klasyfikacji Wangengejma–Girsa i ich relacje z polem ciśnienia na poziomie morza*, Przegląd Geofizyczny, 63 (1–2), 89–122.
- Koźmiński C., Michalska B., 2004, *Zmienność usłonecznienia rzeczywistego w Polsce*, Acta Agrophysica, 3 (2), 291–305.
- Koźmiński C., Michalska B., 2005, *Usłonecznienie w Polsce*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Szczecinie, Szczecin.
- Koźmiński C., Michalska B., 2006, *Usłonecznienie efektywne w Polsce*, Balneologia Polska, 1, 46–50.
- Kuczmarowski M., 1990, *Usłonecznienie Polski i jego przydatność dla helioterapii*, IGiPZ PAN, Dokumentacja Geograficzna, 4.
- Lewik P., Matuszko D., Morawska-Horawska M., 2010, *Multi-annual variability of cloudiness and sunshine duration in Kraków between 1826 and 2005*, [w:] R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.), *The Polish climate in the European context: an historical overview*, Springer Netherlands, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 341–353.
- Lityński J., 1969, *Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski*, Prace PIHM, 97, 3–14.
- Marsz A.A., 2005, *Czy cyrkulacja atmosferyczna jest zdeterminowana i przewidywalna*, [w:] E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, J. Sekutnicki (red.), *Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne*, Polskie Towarzystwo Geofizyczne i Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 32–52.

- Marsz A.A., 2012, *Cyrkulacja atmosferyczna w atlantycko-eurazjatyckim sektorze cyrkulacyjnym – schemat warunkowań i mechanizmów działania*, [w:] Z. Bielec-Bąkowska, E. Łupikasza, A. Widawski (red.), *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*, Prace Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, 74, Sosnowiec, 101–117.
- Marsz A.A., 2015a, *Cyrkulacja termohalinowa na Atlantyku Północnym a temperatura powietrza w Polsce (1961–2010)*, *Przegląd Geofizyczny*, 60 (3–4), 109–131.
- Marsz A.A., 2015b, *Model zmian powierzchni lodów morskich Arktyki (1979–2013) – zmienne sterujące w modelu „minimalistycznym” i ich wymowa klimatyczna*, *Problemy Klimatologii Polarnej*, 25, 249–334.
- Marsz A.A., Styszyńska A., 2009, *Oceanic control of the warming processes in the Arctic – a different point of view for the reasons of changes in the Arctic climate*, *Problemy Klimatologii Polarnej*, 19, 7–31.
- Matuszko D., 2009, *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Matuszko D., 2012, *Porównanie wartości usłonecznienia mierzonego heliografem Campbella-Stokesa i czujnikiem elektronicznym CSD3*, *Przegląd Geofizyczny*, 58 (1), 3–10.
- 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.
- Matuszko D., Piotrowicz K., 2018, *Związek usłonecznienia i temperatury powietrza na podstawie wieloletniej serii klimatologicznej w Krakowie (1884–2016)*, *Przegląd Geofizyczny*, 63 (1–2), 15–29.
- Matuszko D., Węglarczyk S., 2015, *Relationship between sunshine duration and air temperature and contemporary global warming*, *International Journal of Climatology*, 35(12), 3640–3653.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W., 1972, *The Limits of the Growth. A Report the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, New York.
- Meinke J., Quadfasel D., Berger W.H., Brander K., Dickson R.R., Haugan P.M., Latif M., Marotzke J., Marshall J., Minster J.F., Pätzold J., Parilla G., de Ruijter W., Schott F., 2003, *Variability of the Thermohaline Circulation (THC)*, [w:] G. Wefer, F. Lamy, F. Mantoura (red.), *Marine Science Frontiers for Europe*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 39–60.
- Morawska-Horawska M., 2002, *Tendencje zachmurzenia i usłonecznienia Krakowa w latach 1861–1990*, [w:] G. Wójcik, K. Marciniak (red.), *Działalność naukowa profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja*. Sympozjum Klimatologiczne na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika, Toruń 16–17 IX 1993. Wydawnictwo UMK, Toruń, 341–351.
- Niedźwiedz T., 1981, *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, *Rozprawy Habilitacyjne Uniwersytetu Jagiellońskiego*, 58, Wyd. UJ, Kraków.
- Osuchowska-Klein B., 1978, *Katalog typów cyrkulacji atmosferycznej*, IMGW, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.

- Osuchowska-Klein B., 1991, *Katalog typów cyrkulacji atmosferycznej 1976–1990*, IMGW, Warszawa.
- Podstawczyńska A., 2004, *Cechy dobowego i rocznego przebiegu usłonecznienia w Łodzi w latach 1951–2000*, Acta Geographica Lodziensia, 89, 131–144.
- Podstawczyńska A., 2007a, *Cechy solarne klimatu Łodzi*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 7, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Podstawczyńska A., 2007b, *Usłonecznienie w Łodzi w drugiej połowie XX wieku*, [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, IGiGP UJ, Kraków, 235–244.
- Russak V., 1990, *Trends of solar radiation, cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia*, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 42 (2), 206–210.
- 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, D20115.
- 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.
- Savichev A.I., Mironicheva N.P., Cepelev V.Yu., 2015, *Osobennosti kolebanij atmosfernoj cirkuljacii v Atlantiko-evropejskom sektore polushariya v poslednie desyatiletiya*, Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta, 39, 120–131.
- Schlesinger M.E., Ramankutty N., 1994, *An oscillation in the global climate system of period 65–70 years*, Nature, 367, 723–726.
- Stanhill G., 2005, *Global dimming: A new aspect of climate change*. Weather, 60 (1), 11–14.
- Stanhill G., Cohen S., 2001, *Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences*, Agricultural and Forest Meteorology, 107 (4), 255–278.
- Stanhill G., Cohen S., 2005, *Solar radiation changes in the United States during twentieth century: Evidence from sunshine duration measurements*, Journal of Climate, 18 (10), 1503–1512.
- Urban G., Migala K., Pawliczek P., 2018, *Sunshine duration and its variability in the main ridge of the Karkonosze Mountains in relation to with atmospheric circulation*, Theoretical and Applied Climatology, 131 (3–4), 1173–1189.
- Uscka-Kowalkowska J. Kejna M., Maszewski R., 2015, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na usłonecznienie w Koniczynie k/Torunia w latach 1999–2013*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, 70 (2), 131–147.
- Vangengejm G.Ya., 1952, *Osnovy makrocirkulacionnogo metoda dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov dlya Arktyki*, Trudy AANII, 34, 11–66.
- Werner P.C., Gerstengarbe F.-W., 2010, *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881–2009)*, PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research), 119, Potsdam.
- Wild M., 2009, *Global Dimming and Brightening: A review*, Journal of Geophysical Research, 114, D00D16.

- Wild M., 2014, *Global Dimming and Brightening*, [w:] B. Freedman (red.), *Global Environmental Change*, Springer Science + Business Media, Dordrecht, 39–47.
- Wild M., Gilgen H., Roesch A., Ohmura A., Long Ch.N., Dutton E.G., Forgan B., Kallis A., Ruddak V. Tsvetkov A., 2005, *From dimming to brightening: Decadal changes in surface solar radiation*, *Science*, 308, 5723, 847–850.
- Wild M., Truessel B., Ohmura A., Long C.N., König-Langlo G., Dutton E.G., Tsvetkov A., 2009, *Global dimming and brightening: An update beyond 2000*, *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Zverev A.S., 1977, *Sinopticheskaya meteorologia*, 2, Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Żmudzka E., 2004, *Wielkość zachmurzenia w Polsce a epoki cyrkulacyjne*, *Przegląd Geofizyczny*, 49 (1–2), 25–42.
- Żmudzka E., 2007, *Zmienność zachmurzenia nad Polską i jej uwarunkowania cyrkulacyjne (1951–2000)*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 477, Warszawa.

Andrzej A. Marsz
Polskie Towarzystwo Geofizyczne
aamarsz127@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1962-8004

Anna Styszyńska
Stowarzyszenie Klimatologów Polskich
00-927 Warszawa, ul. Krakowskie Przedmieście 30
astys19@wp.pl
ORCID: 0000-0001-8763-9154