

WSPÓŁCZESNE PROBLEMY KLIMATU POLSKI

pod redakcją
Longiny Chojnackiej-Ozga
i Haliny Lorenc

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2019



SERIA PUBLIKACJI NAUKOWO-BADAWCZYCH
IMGW-PIB

Recenzenci:

dr Longina Chojnacka-Ożga; dr Urszula Kossowska-Cezak
dr Wojciech Ożga; prof. dr hab. Rajmund Przybylak
prof. dr hab. Joanna Wibig; prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul

Korekta językowa: Urszula Kossowska-Cezak
Skład i łamanie: Rafał Stepnowski

Zadanie

KONFERENCJA „WSPÓŁCZESNE PROBLEMY KLIMATU POLSKI”

finansowane w ramach umowy 555/P-DUN/2019 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego



ISBN: 978-83-64979-33-0

Adres redakcji:

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61, tel. 22 56 94 510, e-mail: rafal.stepnowski@imgw.pl

Spis treści

WSTĘP	5
ROZDZIAŁ 1. Zmiany czasowe wybranych elementów meteorologicznych	7
Skala i przyczyny zmian temperatury najcieplejszych miesięcy roku nad obszarem Polski po roku 1988 (Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska)	9
Anomalie termiczne o dużym zasięgu przestrzennym w Europie (1951-2018) (Urszula Kossowska-Cezak, Robert Twardosz)	27
Ocieplenie klimatu Polski na przykładzie Poznania, na podstawie występowania najcieplejszych i najchłodniejszych miesięcy, pór roku i lat w wieloletniu 1848-2018 (Tomasz Kasprowicz)	41
Zmienność i zróżnicowanie usłonecznienia w Polsce w latach 1971-2018, na podstawie danych naziemnych i satelitarnych (Dorota Matuszko, Krzysztof Bartoszek, Jakub Soroka, Stanisław Węglarczyk)	53
Promieniowanie słoneczne na obszarze Polski w świetle danych satelitarnych 2004-2018 (Piotr Struzik, Małgorzata Kępińska-Kasprzak, Danuta Limanówka, Monika Pajek)	67
Prognoza zmian częstości występowania wybranych bodźców termicznych w wyniku spodziewanych zmian klimatycznych (Tomasz Rozbicki, Katarzyna Rozbicka, Grzegorz Majewski)	83
ROZDZIAŁ 2. Skrajne warunki meteorologiczne i klimatyczne	95
Porównanie warunków meteorologicznych podczas dwóch najsilniejszych fal upałów w Polsce: 1994 i 2015 (Agnieszka Krzyżewska)	97
Długotrwała dodatnia anomalia temperatury powietrza w 2018 roku w Polsce i jej przyczyny cyrkulacyjne (Robert Twardosz, Piotr Wałach)	107
Zmiana narażenia na wysoką temperaturę w Polsce w horyzoncie do 2100 roku na podstawie projekcji klimatycznych EURO-CORDEX (Paulina Jagiełło, Maciej Krystian Jefimow, Joanna Strużewska)	121
ROZDZIAŁ 3. Warunki hydrologiczne wobec zmian klimatu	133
Charakterystyki hydrologiczne małej zlewni południowego Mazowsza od połowy XX wieku (Ewa Kaznowska, Kazimierz Banasik, Agnieszka Hejduk, Adam Krajewski, Michał Wasilewicz, Leszek Hejduk, Jacek Głądecki)	135

Wyjątkowość hydrometeorologiczna lat 2017 i 2018 w województwie zachodniopomorskim na tle zmieniającego się klimatu (Małgorzata Świątek, Szymon Walczakiewicz)	147
Meteorologiczne uwarunkowania powodzi błyskawicznych w Gdańsku w 2018 roku (Daria Babś, Robert Marcinowicz)	161
Ocena odtworzenia pól opadu w modelach klimatycznych z projektu EURO-CORDEX dla obszaru Polski (Krystyna Konca-Kędzierska)	173
ROZDZIAŁ 4. Klimat miast i adaptacja obszarów zurbanizowanych do zmian klimatu	187
Zagrożenia klimatyczne 44 miast w Polsce na podstawie Miejskich Planów Adaptacji do Zmian Klimatu (Grzegorz Dumieński, Alicja Lisowska, Andrzej Tiukało)	189
Wrażliwość miasta Gdańska na zmianę klimatu na przykładzie wybranych zjawisk ekstremalnych (Dawid Biernacik, Ewa Jakusik, Anna Chodubska)	203
Ocena warunków bioklimatycznych w sezonie letnim w latach 1980-2016 na obszarze Warszawy (Katarzyna Rozbicka, Tomasz Rozbicki)	219
ROZDZIAŁ 5. Wpływ warunków meteorologicznych na roślinność	231
Reakcja roślin dziko rosnących na obserwowane ocieplenie klimatu (Małgorzata Kępińska-Kasprzak, Piotr Struzik)	233
Przyczyny i skutki strat w lasach północnej Polski w dniach 11-12 sierpnia 2017 roku (Longina Chojnacka-Oźga, Wojciech Oźga)	245
ZAKOŃCZENIE	257
WYKAZ AUTORÓW Z AFILIACJAMI	259

ZMIENNOŚĆ I ZRÓŻNICOWANIE USŁONECZNIENIA W POLSCE W LATACH 1971-2018, NA PODSTAWIE DANYCH NAZIEMNYCH I SATELITARNYCH

VARIABILITY AND DIVERSIFICATION OF SUNSHINE DURATION IN POLAND IN THE YEARS 1971-2018, ON THE BASIS OF GROUND- AND SATELLITE-BASED DATA

*Dorota MATUSZKO, Krzysztof BARTOSZEK,
Jakub SOROKA, Stanisław WĘGLARCZYK*

1. Wprowadzenie

Promieniowanie słoneczne jest podstawowym źródłem energii dla wszystkich procesów na powierzchni Ziemi i w atmosferze, a najdłużej mierzoną jego charakterystyką jest usłonecznienie. Dotychczasowe prace dotyczące usłonecznienia na obszarze całej Polski oparte były na krótkich seriach pomiarowych i obejmowały analizę danych do końca XX wieku [Gorczyński 1912; Merecki 1914; Stenz 1930; Kłysik 1969; Chomicz, Kuczmarska 1971; Kuczmarski 1990; Koźmiński, Michalska 2005]. We współczesnej literaturze klimatologicznej brakuje publikacji, które uwzględniałyby najnowsze dane, zwłaszcza że wyniki badań na podstawie długoletnich serii heliograficznych wskazują na istotne zmiany wielkości usłonecznienia od lat 80. ubiegłego wieku do czasów współczesnych [Bryś, Bryś 2005; Bryś 2008; Matuszko 2014; Manara i in. 2015; Sanchez-Lorenzo i in. 2015]. W tym okresie w wielu miejscach na świecie obserwowana jest tendencja wzrostu usłonecznienia nazywana efektem „globalnego rozjaśnienia” [Norris, Wild 2007; Sanchez-Lorenzo i in. 2007; Sanchez-Lorenzo i in. 2008; Matuszko 2016]. Z tego powodu ważnym zagadnieniem jest poznanie aktualnego zróżnicowania warunków solarnych w Polsce na podstawie najnowszych danych heliograficznych.

Celem opracowania jest charakterystyka zmienności i zróżnicowania przestrzennego usłonecznienia w Polsce na podstawie danych naziemnych i satelitarnych.

2. Materiały źródłowe i metody

Początkowo w opracowaniu zamierzano wykorzystać wyłącznie dane z naziemnych stacji pomiarowych. Jednak analiza ciągów heliograficznych pochodzących z polskiej sieci stacji meteorologicznych wykazała wiele wątpliwości związanych z jakością i reprezentatywnością danych. Do najważniejszych problemów, oprócz luk w danych, należały zmiana lokalizacji stacji lub położenia heliografu, krótkie serie pomiarowe, zmiana przyrządu pomiarowego lub brak informacji typu metadane. Bardzo przydatna w interpretacji wyników byłyby możliwość pozna-

nia dokumentacji stacji, np. dotyczącej zasłonięcia horyzontu, zmiany miejsca pomiaru bądź zmiany przyrządu. Obecnie główną przyczyną błędów w analizie usłonecznienia jest zastąpienie tradycyjnego heliografu przyrządem automatycznym. Na stacjach klimatologicznych pomiary heliograficzne wykonywane są nadal za pomocą heliografu Campbella-Stokesa, natomiast na stacjach synoptycznych od 2014 r. przyrządem podstawowym jest czujnik automatyczny CSD3.

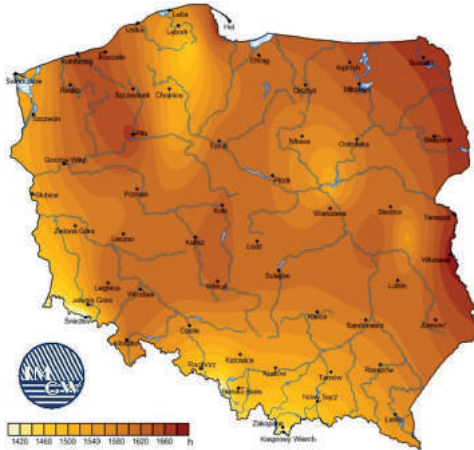
Przykładem trudności w obiektywnej ocenie zróżnicowania usłonecznienia w Polsce na podstawie danych naziemnych są mapy zamieszczone na stronie internetowej klimat.pogodynka.pl/pl/climate-maps/#Sunshine/. Rozkład sum rocznych na mapie (rys. 1) różni się od zróżnicowania usłonecznienia przedstawionego np. w *Atlasie Klimatu Polski* [Lorenc 2005], mimo że obie mapy oparte są na danych z tego samego wielolecia (1971-2000). Rozkład izolinii jest bardziej zróżnicowany, tworzą się „pawie oczka” świadczące o uwarunkowaniach lokalnych poszczególnych stacji. Problem z jednorodnością danych pojawił się po wprowadzeniu na stacjach synoptycznych urządzeń automatycznych. Od tego momentu w seriach heliograficznych istnieje wiele braków, a wartości usłonecznienia ze stacji klimatologicznych są niższe w porównaniu z danymi ze stacji synoptycznych.

Wymienione wątpliwości, dotyczące jakości danych z naziemnych stacji pomiarowych, skłoniły autorów do wykorzystania również danych satelitarnych, które stanowią dobrą bazę referencyjną do badania homogeniczności usłonecznienia na podstawie danych naziemnych.

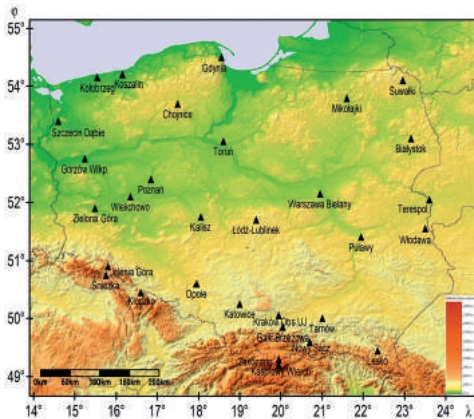
W opracowaniu wykorzystano dane (SDU^{met}) z wielolecia 1971-2018 z dwudziestu dziewięciu stacji IMGW-PIB¹ i dwóch stacji Uniwersytetu Jagiellońskiego. Wstępny etap pracy polegał na weryfikacji i homogenizacji danych. Z powodu luk w seriach heliograficznych, spośród wstępnej liczby czterdziestu pięciu stacji, do ostatecznej analizy wybrano trzydzieści jeden stacji (rys. 2). Pojedyncze braki danych uzupełniono, a serie ze stacji synoptycznych, z powodu zmiany przyrządu pomiarowego, poddano homogenizacji [Matuszko i in., w przygotowaniu]. Dane z dziewięciu stacji (Gaik-Brzezowa, Gdynia, Kasprowy Wierch, Kraków, Poznań, Puławy, Śnieżka, Warszawa-Bielany, Wielichowo) pochodzą wyłącznie z pomiarów wykonanych tradycyjnym heliografem Campbella-Stokesa, natomiast z pozostałych dwudziestu dwóch stacji synoptycznych (od 2014 r.) – z pomiarów automatycznych.

Wszystkim stacjom meteorologicznym ujętym w opracowaniu (rys. 2) przypisano wartości usłonecznienia (SDU^{sat}), które były wynikiem obserwacji satelitów geostacjonarnych Meteosat pierwszej i drugiej generacji. Wykorzystano dane satelitarne z produktu SDU – Sunshine Duration, v003 [Pfeifroth i in. 2019] o rozdzielczości $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (około $3,5 \text{ km} \times 5,5 \text{ km}$), pochodzące z najbliższego piksela danej stacji meteorologicznej. W bazie danych Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat (SARAH-2) dostępne są dane z wielolecia 1983-2018, i takie właśnie pozyskano do przedstawienia zróżnicowania przestrzennego usłonecznienia w Polsce. W metodzie teledetekcyjnej podstawowymi informacjami o wielkości usłonecznienia są algorytmy uwzględniające długość dnia (gdy wysokość Słońca nad horyzontem $>2,5^\circ$) oraz dopływ do powierzchni Ziemi bezpośredniego promieniowania słonecznego (I_m) o natężeniu $\geq 120 \text{ Wm}^{-2}$ [Kothe i in. 2017].

¹ <https://danepubliczne.imgw.pl/>, częściowo przetworzone



Rys. 1. Sumy roczne usłonecznienia na podstawie danych z wieloletnia 1971-2000 [źródło: <http://klimat.pogodynka.pl/pl/climate-maps/#Sunshine/Yearly/1971-2000/1/Winter>]



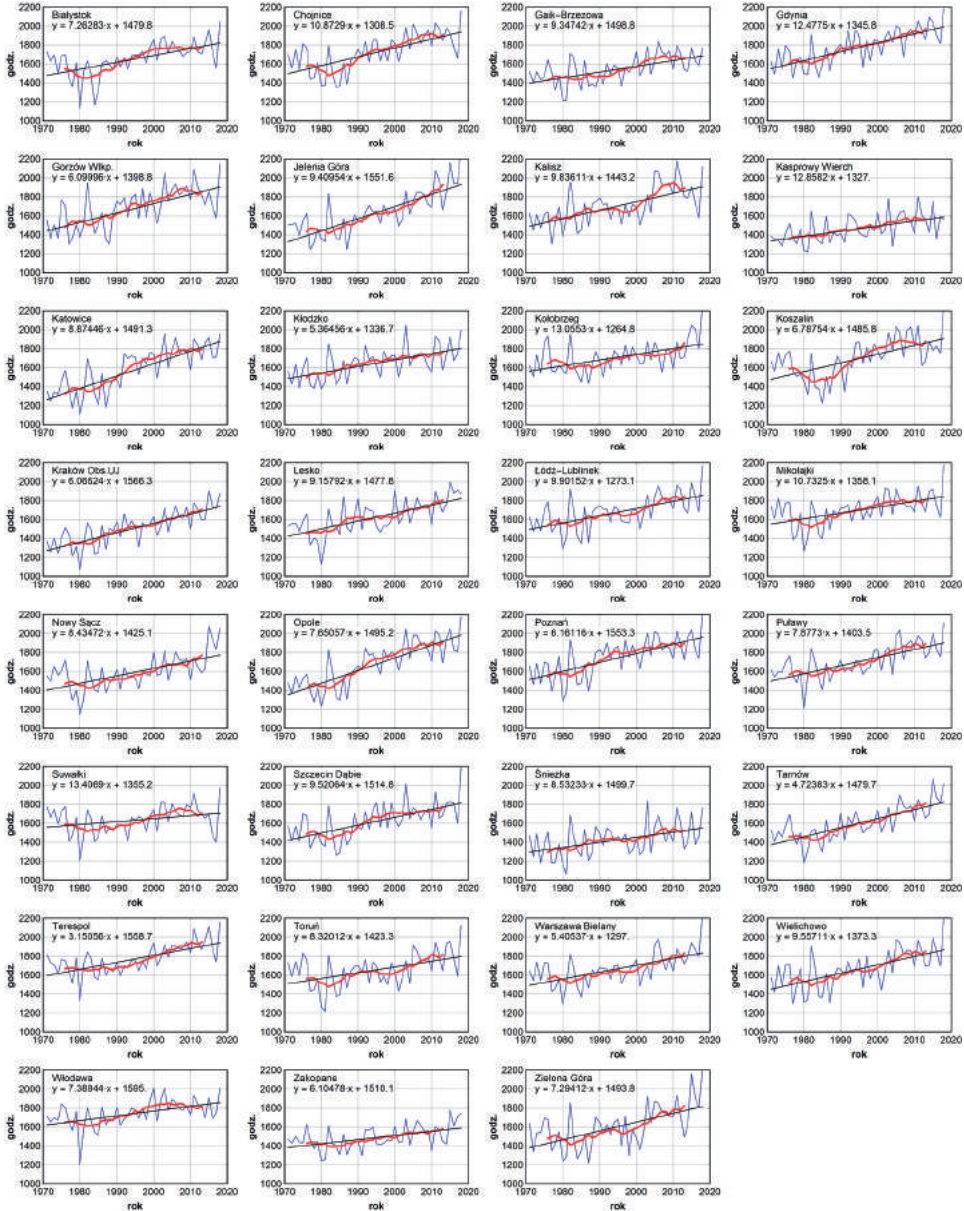
Rys. 2. Położenie stacji meteorologicznych wykorzystanych w opracowaniu

Na podstawie danych naziemnych i satelitarnych obliczono sumy miesięczne, a następnie sezonowe i roczne, które przedstawiono na mapach. Interpolację danych na mapach wykonano metodą kriginu przy użyciu programu Surfer 16 firmy Golden Software.

3. Wieloletnia zmienność usłonecznienia na podstawie danych naziemnych (1971-2018)

Średnia suma roczna usłonecznienia z lat 1971-2018 ze wszystkich rozpatrywanych stacji wynosi 1647,4 godziny. Najmniejsza jest na Śnieżce (1429,5), największa w Gdyni (1782,1) – rozpiętość średnich sum rocznych osiąga ponad 350 godzin. W poszczególnych latach różnica może być jeszcze większa (rys. 3), np. w Jeleniej Górze maksymalna suma roczna wyniosła 2324,9 godziny (2018 r.), a na Śnieżce minimalna – 1064,2 godziny (1981 r.).

Przebieg wieloletni sum rocznych usłonecznienia wykazuje trend rosnący na wszystkich stacjach, istotny statystycznie na poziomie 5% (z wyjątkiem Suwałk). Największy przyrost godzin ze słońcem (średnio 130 h / 10 lat) wystąpił w Opolu, Katowicach i Jeleniej Górze, najmniejszy



Rys. 3. Przebieg wieloletni sum rocznych usłonecznienia (1971-2018): linia niebieska – sumy roczne, linia czerwona – 11-letnia średnia ruchoma, linia czarna – trend liniowy

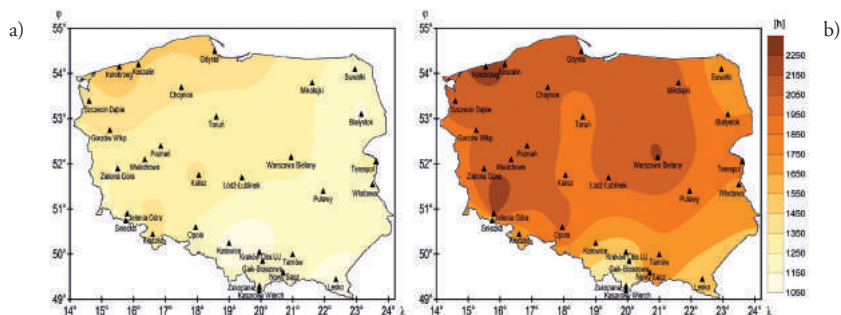
(poniżej 50 h/10 lat) w Suwałkach i Zakopanem. Na wszystkich stacjach najmniejsze sumy roczne usłonecznienia wystąpiły w latach 80. XX w., najczęściej (na siedemnastu stacjach) minimum przypadało na rok 1980, a następnie w latach: 1977 (pięć stacji), 1981 (cztery stacje), 1984 i 1987 (po dwie stacje) oraz 1985 (jedna stacja). Jest to końcówka okresu określonego w literaturze klimatologicznej jako tzw. globalne zaciemnienie (ang. *global dimming*), ponieważ

na wielu stacjach na świecie notowano wówczas bardzo niskie sumy usłonecznienia [Norris, Wild 2007; Sanchez-Lorenzo i in. 2007; Sanchez-Lorenzo i in. 2008; Matuszko 2014; Manara i in. 2015; Matuszko 2016; Sanchez-Lorenzo i in. 2015). Fakt ten tłumaczono zwiększoną zawartością aerozoli emitowanych przez przemysł i czynnikami cyrkulacyjnymi powodującymi wzrost zachmurzenia. Dodatkową przyczyną minimalnych sum usłonecznienia w latach 1980 i 1981 mógł być wybuch wulkanu Świętej Heleny w maju 1980 roku. Unoszące się w powietrzu aerozole wulkaniczne mogły bezpośrednio, jak i pośrednio, przez wzrost zachmurzenia, przyczynić się do ograniczenia dopływu promieniowania słonecznego. Taki związek między erupcją wulkanów a usłonecznieniem wykazali m.in. Stanhill i Cohen [2005].

W kolejnych latach, aż do 2018 r., usłonecznienie nieregularnie wzrastało, szczególnie wyraźnie w pierwszej dekadzie XXI w., a na większości stacji roczne wartości usłonecznienia przekraczały 1600 godzin; w kolejnych latach – 1700 godzin i więcej. Wyjątkiem był rok 2010, w którym sumy te na większości stacji spadły o ponad 100 godzin, czego przyczyną mógł być wybuch wulkanu Eyjafjallajökull na Islandii.

Maksymalne sumy usłonecznienia przypadają na koniec badanego okresu, z rekordowymi wielkościami w 2018 roku, gdy średnia suma roczna usłonecznienia ze wszystkich rozpatrywanych stacji wyniosła 2068,7 godzin, czyli była wyższa o 421 godzin niż średnio w wieloleciu.

W poszczególnych latach mogą występować duże różnice w rozkładzie sum rocznych usłonecznienia, czego przykładem są mapy wykonane na podstawie danych z lat 1980 i 2018 (rys. 4). W roku 1980 sumy usłonecznienia wahały się od 1067,2 godzin w Krakowie do 1575,7 godzin w Kołobrzegu. Największe wartości występowały na wybrzeżu Bałtyku i stopniowo malały w kierunku wschodnim i południowym. W 2018 roku także południe i południowy wschód Polski cechują najniższe sumy usłonecznienia, ale wystąpiły one w górach: na Kasprowym Wierchu (1562,3 godziny), w Zakopanem (1742,1) i na Śnieżce (1763,7). Na dużym obszarze, w północno-zachodniej połowie kraju sumy roczne przekraczały 2000 godzin (na dwudziestu sześciu stacjach), a najwyższe wartości wystąpiły w Jeleniej Górze, Kołobrzegu, Warszawie, Koszalinie i Poznaniu (tab. 1). Na dziewięciu stacjach różnica w sumie rocznej usłonecznienia między rokiem 1980 a 2018 wyniosła ponad 900 godzin, a największa była w Zielonej Górze i w Warszawie (tab. 1). Warto zwrócić uwagę na wielkość zmian systematycznych wynikających z istnienia trendu liniowego, których względna wielkość waha się od 15,5% w Suwałkach do 61,7% na Kasprowym Wierchu.



Rys. 4. Sumy roczne usłonecznienia na podstawie danych naziemnych: a) 1980 r., b) 2018 r.

Tabela 1. Porównanie sum rocznych usłonecznienia w 1980 i 2018 r. na wybranych stacjach w Polsce

Stacja	Suma roczna 1980 (godziny)	Suma roczna 2018 (godziny)	Różnica (godziny)	Różnica wynikająca z trendu liniowego	
				(godziny)	(%)
Białystok	1127,8	2043,6	915,8	276,0	30,1
Chojnice	1369,5	2161,3	791,8	355,2	44,9
Gaik-Brzezowa	1217,6	1770,5	552,9	231,8	41,9
Gdynia	1494,9	2184,8	689,9	357,6	51,8
Gorzów Wlkp.	1372,0	2147,8	775,8	373,8	48,2
Jelenia Góra	1355,3	2324,9	969,6	488,6	50,4
Kalisz	1378,0	2117,3	739,3	337,2	45,6
Kasprowy Wierch	1231,9	1562,3	330,4	203,9	61,7
Katowice	1106,5	1955,8	849,3	496,1	58,4
Kłodzko	1380,7	1995,1	614,4	257,9	42,0
Kołobrzeg	1575,7	2292,9	717,2	230,5	32,1
Koszalin	1464,0	2251,8	787,8	348,0	44,2
Kraków Obserwatorium UJ	1067,2	1874,3	807,1	376,3	46,6
Lesko	1126,7	1874,9	748,2	320,5	42,8
Łódź-Lublinek	1287,1	2169,8	882,7	290,7	32,9
Mikołajki	1265,4	2176,9	911,5	234,1	25,7
Nowy Sącz	1144,0	2056,7	912,7	299,3	32,8
Opole	1232,7	2177,8	945,1	509,5	53,9
Poznań	1279,4	2224,6	945,2	361,8	38,3
Puławy	1209,4	2110,0	900,6	324,2	36,0
Suwałki	1204,1	1975,1	771,0	119,7	15,5
Szczecin Dąbie	1387,2	2186,7	799,5	316,2	39,6
Śnieżka	1168,9	1763,7	594,8	205,4	34,5
Tarnów	1181,8	2013,9	832,1	363,2	43,6
Terespól	1331,9	2161,3	829,4	280,8	33,9
Toruń	1265,0	2123,3	858,3	232,0	27,0
Warszawa Bielany	1289,2	2262,3	973,1	277,2	28,5
Wielichowo	1312,8	2202,1	889,3	336,4	37,8
Włodawa	1199,4	2011,3	811,9	191,3	23,6
Zakopane	1246,4	1742,1	495,7	164,9	33,3
Zielona Góra	1239,3	2216,1	976,8	352,8	36,1

4. Zróżnicowanie przestrzenne usłonecznienia w Polsce na podstawie danych naziemnych i satelitarnych (1983-2018)

Średnie sumy roczne usłonecznienia z wielolecia 1983-2018, liczone na podstawie danych naziemnych, wahają się w Polsce od około 1460-1500 godzin na południu i południowym zachodzie kraju (obszary górskie) do 1800-1830 godzin na północy, w rejonie wschodniego wybrzeża Bałtyku (rys. 5a). Obszar dużego usłonecznienia (powyżej 1750 godzin) ciągnie się klinem na południe od środkowej części Pobrzeża Południowobałtyckiego do Niziny Śląskiej. Drugi obszar najwyższych wartości usłonecznienia znajduje się w środkowo-wschodniej części Polski, obejmując fragment Niziny Północnopodlaskiej i Południowopodlaskiej oraz Polesie Zachod-

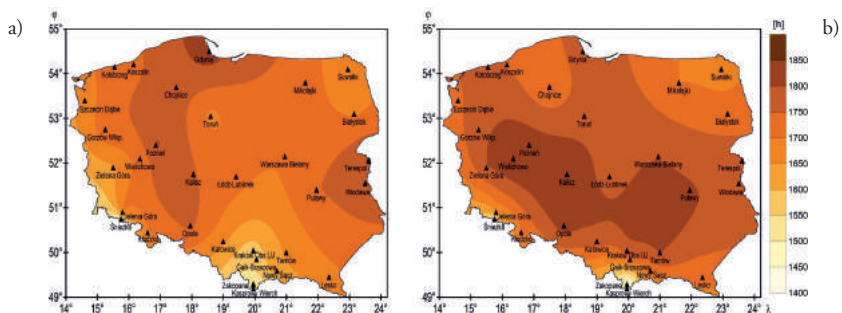
nie. Na przeważającym terenie kraju usłonecznienie waha się od 1700 do 1750 godzin rocznie i stopniowo maleje od centrum w kierunku południowo-zachodnim, południowym i północno-wschodnim. Wyraźnie zaznacza się wzrost usłonecznienia od obszarów górskich w kierunku nizin centralnej Polski.

Rozkład średnich sum rocznych usłonecznienia na podstawie danych satelitarnych (rys. 5b) zachowuje ogólną tendencję wzrostu usłonecznienia z południa i południowego zachodu do centrum Polski, jednak inny jest obszar najwyższych wartości (powyżej 1800 godzin), ponieważ obejmuje rozległy teren środkowej Polski od Pojezierza Wielkopolskiego po Wyżynę Małopolską. Na południu i południowy zachód od tej strefy sumy usłonecznienia maleją, do najniższych wartości w górach (poniżej 1500 godzin). Spadek usłonecznienia ma większe nasilenie i nie zaznacza się klin obniżonego usłonecznienia w kierunku doliny środkowej Wisły. Północny wschód Polski wyróżnia się także (jak na rys. 5a) niższymi wartościami, natomiast tereny nad Zatoką Gdańską nie zaznaczają się jako obszar uprzywilejowany pod względem insolacyjnym. Środkowe wybrzeże po Pradolinę Toruńsko-Eberswaldzką ma nawet niższe wartości w porównaniu z zachodnim wybrzeżem i środkową Polską, co także różni tę mapę od rozkładu usłonecznienia na podstawie danych naziemnych.

Porównanie rysunków 5a i 5b wskazuje, że sumy usłonecznienia z danych satelitarnych są raczej wyższe niż te uzyskane z danych naziemnych, czego potwierdzeniem są znacznie większe obszary o sumach powyżej 1700 godzin przedstawione na rysunku 5b.

Wielkość usłonecznienia w poszczególnych porach roku zależy od długości dnia i zachmurzenia, zatem sumy godzin ze słońcem są największe latem (czerwiec-sierpień), a najmniejsze zimą (grudzień-luty). Kontrasty między tymi porami roku wzmocnione są nie tylko różnym stopniem zachmurzenia, ale także jego typem – w lecie konwekcyjnym, a w zimie warstwowym.

W zimie na znacznym obszarze kraju sumy usłonecznienia mierzonych na stacjach naziemnych nie przekraczają 150 godzin (rys. 6a). Ze względu na większą o ponad godzinę długość dnia i mniejsze zachmurzenie na południu Polski, usłonecznienie maleje w kierunku północnym. Najmniejszym usłonecznieniem zimą (poniżej 100 godzin) odznacza się wschodnia część Pojezierza Mazurskiego, Nizina Podlaska oraz Wysoczyzna Białostocka. W terenach górskich i pogórskich na południu Polski notuje się ponad dwukrotnie wyższe wartości w porównaniu do północnej części kraju. W zimie, szczególnie podczas sytuacji wyżowych, w dolinach i w obniżeniach terenu

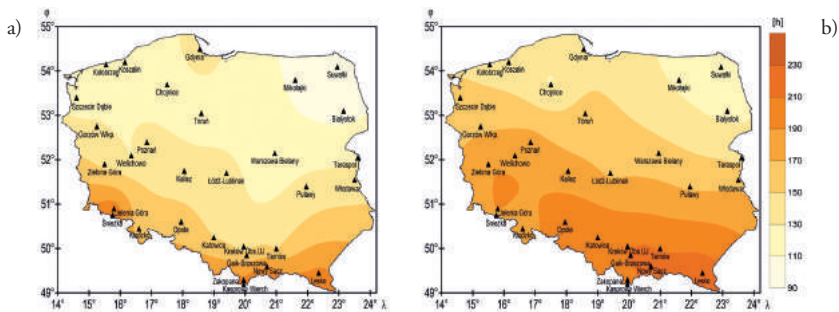


Rys. 5. Średnie sumy roczne usłonecznienia na podstawie danych: a) naziemnych, b) satelitarnych (lata 1983-2018)

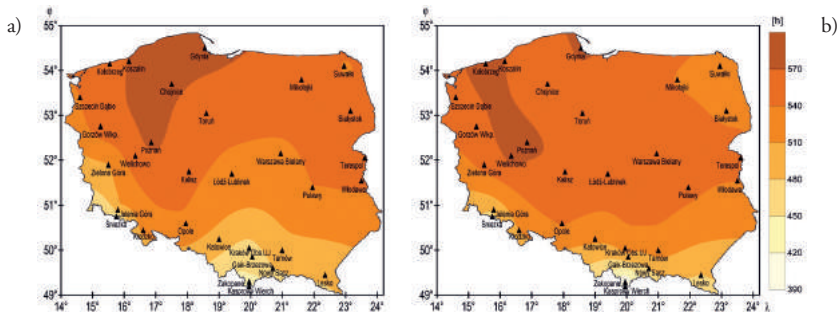
tworzą się zastoiska zimnego powietrza. Inwersyjny rozkład temperatury sprzyja zaleganiu mgły i niskich chmur warstwowych. Na wzniesieniach położonych ponad warstwą inwersyjną panuje wówczas bezchmurna pogoda i szczyty górskie, także ze względu na dużą przezroczystość powietrza, otrzymują maksymalne wartości usłonecznienia w porównaniu z resztą kraju. Na terenach górskich w chłodnym półroczu przy sytuacjach wyżowych dochodzi do zaniku chmur na skutek oddziaływania „fenów swobodnych”, co sprzyja dużemu usłonecznieniu.

Przestrzenne zróżnicowanie zimowych sum usłonecznienia obliczanego na podstawie danych satelitarnych (rys. 6b) jest w ogólnym zarysie zbliżone do obrazu z danych naziemnych (rys. 6a). Wartości najwyższe (powyżej 190 godzin) występują na południu Polski i stopniowo maleją w kierunku północnym, do minimum (110 godzin) na północnym wschodzie kraju i lokalnie na Pojezierzu Zachodniopomorskim. Cechą różniącą rozkład usłonecznienia na podstawie danych satelitarnych, oprócz generalnie wyższych wartości, jest trudne do wyjaśnienia podwyższenie wartości we wschodniej części Karpat.

Wiosną sumy usłonecznienia wahają się od 410 godzin na południu Polski do ponad 510 godzin w północnej połowie kraju (rys. 7a). Najwyższe wartości (powyżej 570 godzin) występują na Pobrzeżu Koszalińskim i Gdańskim oraz na Pojezierzu Południowopomorskim. W zachodniej części kraju sumy usłonecznienia maleją klinem w kierunku Przedgórze Sudeckiego i Sudetów. Natomiast drugi klin przechodzi przez środek Polski w odwrotnym kierunku, od mini-



Rys. 6. Sumy usłonecznienia w zimie (grudzień, styczeń, luty) na podstawie danych: a) naziemnych, b) satelitarnych (lata 1983-2018)

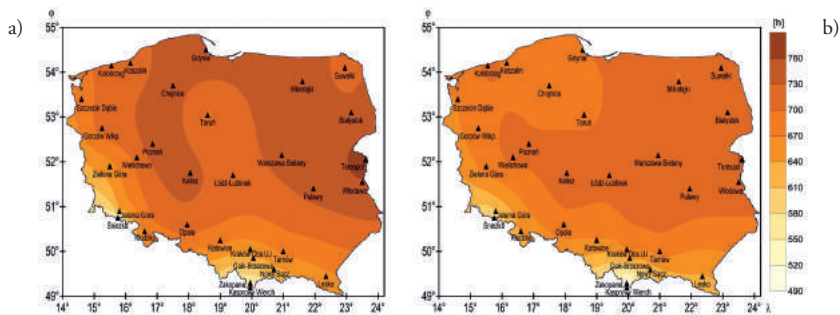


Rys. 7. Sumy usłonecznienia na wiosnę (marzec, kwiecień, maj) na podstawie danych: a) naziemnych, b) satelitarnych (lata 1983-2018)

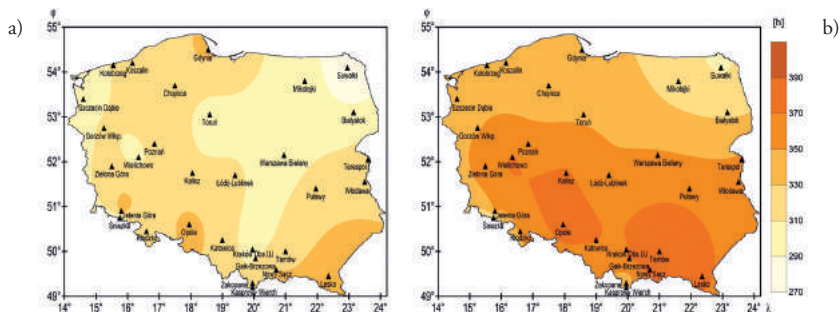
mum nad obszarem Tatr do Niziny Środkowomazowieckiej i dalej na północ. Na wschodzie Polski, od północy kraju do Polesia, sumy usłonecznienia przekraczają 500 godzin, a następnie dalej na południe nieznacznie maleją. Jedynie w okolicach Suwałk (Pojezierze Mazurskie) zaznacza się obszar z obniżonym usłonecznieniem.

O tej porze roku cechą wspólną rozkładu usłonecznienia na podstawie danych naziemnych i satelitarnych jest wzrost usłonecznienia z południa na północ (rys. 7a-b). Jednak obszar z najwyższymi wartościami (powyżej 570 godzin) na rysunku 7b jest podzielony na wąski pas nad Zatoką Gdańską i klin sięgający od zachodniej części Pobrzeża Szczecińskiego do Niziny Południowopolskiej. Izolinie na południu są bardziej zagęszczone, a obszar z obniżonym usłonecznieniem w północno-wschodniej Polsce zajmuje znacznie większą powierzchnię niż na rysunku 7a.

W lecie usłonecznienie w Polsce jest czterokrotnie większe niż w zimie, co wiąże się nie tylko z uwarunkowaniami astronomicznymi (długość dnia), ale także z dużym, przeważnie warstwowym zachmurzeniem w chłodnej części roku. Rozciągłość południkowa naszego kraju powoduje, że długość dnia na krańcach północnych jest w lecie o ok. 1,1 godziny większa niż na skraj południowym. Sumy roczne usłonecznienia w dużym stopniu zależą od sumy usłonecznienia z miesięcy letnich, dlatego zróżnicowanie przestrzenne usłonecznienia w tej porze roku nawiązuje do rozkładu sum rocznych. Ze względu na długość dnia widoczne jest uprzywilejowanie insolacyjne północnej połowy Polski i zmniejszanie się usłonecznienia z północy na południe (rys. 8a).



Rys. 8. Sumy usłonecznienia w lecie (czerwiec, lipiec, sierpień) na podstawie danych: a) naziemnych, b) satelitarnych (lata 1983-2018)



Rys. 9. Sumy usłonecznienia w jesieni (wrzesień, październik, listopad) na podstawie danych: a) naziemnych, b) satelitarnych (lata 1983-2018)

Zaznacza się także obniżanie usłonecznienia ze wschodu na zachód, co związane jest z przewagą cech oceanicznych klimatu na zachodzie kraju i większym zachmurzeniem niż na wschodzie, szczególnie na Nizinie Południowopodlaskiej i Polesiu Zachodnim, gdzie występują maksymalne wartości usłonecznienia (760 godzin). Najmniejsze usłonecznienie (poniżej 500 godzin) cechuje obszary górskie, Tatry i Sudety, ze względu na mniejszą długość dnia niż na północy Polski i duże zachmurzenie konwekcyjne nawet przy sytuacjach wyżowych.

Rozkład sum usłonecznienia na podstawie danych satelitarnych (ryc. 6b) zachowuje ogólne tendencje wzrostu z południa na północ i z zachodu na wschód, a wartości są niższe w porównaniu z danymi naziemnymi (rys. 8a). Nie zaznacza się uprzywilejowanie insolacyjne wschodniego wybrzeża Bałtyku i tylko na niewielkim obszarze Polesia Zachodniego występują maksymalne sumy usłonecznienia (powyżej 730 godzin).

W jesieni zróżnicowanie przestrzenne sum usłonecznienia na podstawie danych naziemnych jest małe w porównaniu z innymi porami roku, a wartości są o ponad połowę mniejsze niż w lecie. Suma godzin ze słońcem waha się od minimum 270 na Pojezierzu Mazurskim do 340 w południowo-wschodniej części kraju oraz sporadycznie na Przedgórzu Sudeckim i nad Zatoką Gdańską (rys. 9a). Bardziej słoneczna jest zachodnia połowa Polski (bez pasa na północnym zachodzie) i południowo-wschodnia niż północno-wschodnia i środkowa.

W jesieni wartości sum usłonecznienia na podstawie danych satelitarnych (rys. 9b) są wyższe, a zróżnicowanie przestrzenne jest inne (bardziej równoleżnikowe) niż w przypadku danych naziemnych (rys. 9a). Usłonecznienie w południowej połowie Polski, z wyjątkiem Tatr, Sudetów i Przedgórza Sudeckiego, jest wyższe niż w północnej, zachodniej i północno-wschodniej części kraju. Ten ostatni fragment obszar ma najniższe sumy usłonecznienia zarówno na podstawie danych naziemnych, jak i satelitarnych.

5. Podsumowanie i wnioski

W Polsce, podobnie jak na innych stacjach w Europie, występuje istotny trend rosnący sum rocznych usłonecznienia, mający początek w latach 80. XX w., z maksimum w roku 2018. Wraz ze wzrostem szerokości geograficznej następuje wzrost usłonecznienia w lecie, w półroczu ciepłym (marzec-sierpień) i w roku, natomiast w zimie i w półroczu chłodnym – jego spadek.

Rozkład sum rocznych usłonecznienia w Polsce na podstawie danych satelitarnych nie potwierdził powszechnego poglądu, że obszarami uprzywilejowanymi pod względem insolacyjnym są tereny nadmorskie i środkowo-wschodnia część Polski, lecz rozległy teren od Pojezierza Wielkopolskiego po Wyżynę Małopolską.

Istnieje pewna zgodność danych satelitarnych i naziemnych, lecz dokładność dopasowania zależy od lokalizacji stacji i podlega wahaniom w cyklu rocznym i wieloletnim. Największe rozbieżności między sumami usłonecznienia obliczanymi na podstawie danych naziemnych i satelitarnych występują w rejonach podgórskich i górskich. Ponadto w jesieni i zimie na większości stacji meteorologicznych sumy usłonecznienia określone metodą satelitarną są przeszacowane, a w lecie niedoszacowane.

Pytanie, który obraz zróżnicowania przestrzennego usłonecznienia w Polsce jest bardziej prawdziwy, czy na podstawie danych naziemnych, czy satelitarnych jest nadal aktualne. Wyjaśnienie problemu wymaga dalszych badań.

Literatura

- Bryś K., 2008, Przebieg dobowy i roczny usłonecznienia we Wrocławiu-Swojcu w latach 1961-2006, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych PAN, 526, 53-65
- Bryś K., Bryś T., 2005, Zmienność klimatu solarnego Wrocławia w latach 1891-2003, [w:] Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego, A. Kostrzewski (red.), Biblioteka Monitoringu Środowiska, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, 399-408
- Chomicz K., Kuczmarska L., 1971, Zachmurzenie i usłonecznienie w Polsce, Przegląd Geofizyczny, 16 (1-2), 69-87
- Gorczyński E., 1912, O insolacji ziem polskich, [w:] Charakterystyka fizyczna ziem polskich i charakterystyka fizyczna ludności, Akademia Umiejętności, Kraków, 161-170
- Kłysik K., 1969, O usłonecznieniu w Polsce, Zeszyty Naukowe UŁ. Nauki Matematyczno-Przyrodnicze. Seria II, 32, 89-103
- Kothe S., Pfeifroth U., Cremer R., Trentmann J., Hollmann R., 2017, A satellite-based sunshine duration climate data record for Europe and Africa, Remote Sensing, 9 (5), DOI: 10.3390/rs9050429
- Koźmiński C., Michalska B., 2005, Sunshine in Poland, Akademia Rolnicza w Szczecinie, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin, 110 s.
- Kuczmarski M., 1990, Usłonecznienie Polski i jego przydatność dla helioterapii, Dokumentacja Geograficzna, 4, 67 s.
- Lorenc H. (red.), 2005, Atlas klimatu Polski, IMGW, Warszawa, 116 s.
- Manara V., Beltrano M.C., Brunetti M., Maugeri M., Sanchez-Lorenzo A., Simolo C., Sorrenti S., 2015, Sunshine duration variability and trends in Italy from homogenized instrumental time series (1936-2013), Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 120 (9), 3622-3641, DOI: 10.1002/2014JD022560
- 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., Soroka J., Homogenization of sunshine duration series after the introduction of automatic instruments in Poland (w przygotowaniu).
- Merecki R., 1914, Klimatologia ziem polskich, Druk i Litografia Jana Cotty, Warszawa, 313 s.
- 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 – Atmosphere, 112 (D8), DOI: 10.1029/2006JD007794

- Pfeifroth U., Kothe S., Trentmann J., Hollmann R., Fuchs P., Kaiser J., Werscheck M., 2019, Surface Radiation Data Set – Heliosat (SARAH) – Edition 2.1, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI: 10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01
- Sanchez-Lorenzo A., Brunetti B., Calbo 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 – Atmospheres*, 112 (D20), DOI: 10.1029/2007JD008677
- Sanchez-Lorenzo A., Calbo 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
- Sanchez-Lorenzo A., Wild W., Brunetti M., Guijarro J.A., Hakuba M.Z., Calbo J., Mystakidis S., Bartok B., 2015, Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012). *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 120 (18), 9555–9569, DOI: 10.1002/2015JD023321
- 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 (10), 1503–1512, DOI: 10.1175/JCLI3354.1
- Stenz E., 1930, Sur la distribution géographique de la durée de l'insolation en Pologne, *Kosmos*, 55

Streszczenie

Celem opracowania jest charakterystyka zróżnicowania przestrzennego usłonecznienia w Polsce na podstawie danych naziemnych i satelitarnych. Publikacja jest też głosem w dyskusji na temat wątpliwości metodycznych dotyczących jednorodności serii heliograficznych i możliwości zastąpienia naziemnych danych pomiarowych danymi satelitarnymi.

W opracowaniu wykorzystano dane naziemne i satelitarne z wielolecia 1983–2018 z terenu Polski. Dane naziemne obejmują sumy dobowe usłonecznienia z dwudziestu dziewięciu stacji IMGW-PIB i dwóch stacji UJ. Dane satelitarne obejmują wartości usłonecznienia pochodzące z najbliższego piksela konkretnej stacji meteorologicznej z produktu “SDU – 003”. Wartości te pozyskano z bazy SARAH-2, udostępnianej przez EUMETSAT [Pfeifroth i in. 2019]. Obliczono sumy miesięczne, sezonowe i roczne usłonecznienia, które przedstawiono na mapach, wykonanych metodą kriginu za pomocą programu Surfer 16. Dokonano porównania rozkładu usłonecznienia na podstawie dwóch źródeł danych, obliczono korelacje między nimi. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że średnie sumy roczne usłonecznienia obliczone na podstawie danych naziemnych wahają się od 1460–1500 godzin na południu i południowym zachodzie kraju do 1800–1830 godzin na północy (wschodnie wybrzeże Bałtyku). Na przeważającym terenie kraju usłonecznienie waha się od 1700 do 1750 godzin rocznie i stopniowo maleje od centrum, w kierunku południowo-zachodnim, południowym i północno-wschodnim. Wyraźnie zaznacza się wzrost usłonecznienia od obszarów górskich w kierunku nizin centralnej Polski. Rozkład sum rocznych usłonecznienia na podstawie danych satelitarnych obalił powszechny pogląd, że obszarami uprzywilejowanymi pod względem insolacyjnym są tereny nadmorskie i środkowo-wschodnia część Polski.

Słowa kluczowe

Usłonecznienie, pomiary naziemne, dane satelitarne, Polska.

Summary

The aim of the study is to characterize the variability and spatial diversification of sunshine duration in Poland on the basis of ground- and satellite-based data. The study used ground-based data (SDU^{gnd}) from the years 1971-2018 from 29 IMGW-PIB stations and two stations of the Jagiellonian University. All meteorological stations included in the study were assigned sunshine duration values (SDU^{sat}), which were the result of observations by the first and second generation Meteosat satellites [Pfeifroth et al. 2019]. Based on ground and satellite data from the years 1983-2018, monthly, seasonal and annual sums were calculated, and were presented on the maps. As a result of the analysis, it was found that there is a significant increasing trend in Poland of annual sunshine duration sums from the 1980s to the maximum in 2018. Average annual sunshine duration sums calculated on the basis of ground-based data range from 1460-1500 hours in the south and south-west of the country to 1800-1830 hours in the north - the eastern Baltic coast by the Gulf of Gdansk. In the prevailing area of the country, sunshine duration ranges from 1700 to 1750 hours per year and gradually decreases from the center towards the south-west, south and north-east. The increase in sunshine duration from mountainous areas towards the lowlands of central Poland is clearly marked. The distribution of annual sums of sunshine duration in Poland on the basis of satellite data has not confirmed the common view that the privileged areas for insolation are the coastal areas and the central and eastern part of Poland, but rather the vast area of central Poland from the Wielkopolskie Lakeland to the Małopolska Upland.

Keywords

Sunshine duration, ground-based measurements, satellite data, Poland.