Acta Agrophysica, 2009, 13(2),

WSPÓŁCZESNE ZMIANY KLIMATU POLSKI

Elwira Żmudzka

Zakład Klimatologii Instytut Geografii Fizycznej,
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
e-mail: elwiraz@uw.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań zmienności czasowej elementów klimatu Polski. Podjęto również próbę wstępnej oceny roli zachmurzenia i cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu klimatu Polski. W analizie wykorzystano przede wszystkim obszarowo uśrednione serie elementów klimatu z terenu Polski nizinnej. Uwzględniono dane z drugiej połowy XX wieku i początku XXI wieku, a w przypadku temperatury powietrza także serią wiekową 1901-2000. Wykorzystano analizę korelacji i regresji prostej oraz wielokrotnej. Wykazano istotne zmiany wartości elementów klimatu składających się na obieg ciepła. W drugiej połowie XX wieku nielosowe fluktuacje promieniowania, usłonecznienia i temperatury wystąpiły wiosną i średnio w roku. Analiza 100-letniej serii temperatury powietrza wskazała na wystąpienie znaczących zmian we wszystkich porach roku oprócz zimy. W przypadku średnich sezonowych sum opadów i wielkości zachmurzenia istotne zmiany nie wystąpiły. Stwierdzono, że bezpośrednim oddziaływaniem cyrkulacji i wielkością zachmurzenia można wyjaśnić do 80% zmienności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych. Wiosną i latem w ostatnim 10-leciu XX wieku było „za ciepło", niż wynikało by to z uwarunkowań cyrkulacyjnych i zachmurzenia, zimą i jesienią natomiast „za chłodno" (mimo iż zimy były coraz cieplejsze). Zróżnicowane sezonowo i przestrzennie tendencje zmian elementów klimatu uwidoczniły się nieznacznie w ich rozkładzie przestrzennym na obszarze Polski oraz w pewnych oznakach zmiany reżimu klimatycznego.

Słowa kluczowe: elementy klimatu, zmiany, cyrkulacja atmosferyczna, związki, Polska

WSTĘP

Mimo bogatej dokumentacji w literaturze klimatologicznej wieloletnich zmian poszczególnych elementów klimatu zagadnienia te stanowią przedmiot nadal podejmowanych badań. Wciąż aktualny problem globalnego ocieplenia, jego zróżnicowania w skali regionalnej, skali i przyczyn, interakcji temperatury i innych elementów klimatu oraz ewentualnych skutków klimatycznych, ekolo-

gicznych i gospodarczych, a także możliwość korzystania z coraz dłuższych serii pomiarowych skłaniają do podjęcia studiów dotyczących współczesnych zmian klimatu na obszarze Polski.

Głównym celem badań jest określenie kierunku i skali zmian czasowych wybranych elementów klimatu Polski. Zwrócono także uwagę na wzajemne powiązania między elementami klimatu. Podjęto również próbę wstępnej oceny roli cyrkulacji atmosferycznej i zachmurzenia w kształtowaniu klimatu Polski.

MATERIAŁ I METODY

W analizie wykorzystano przede wszystkim obszarowo uśrednione serie elementów klimatu z terenu Polski nizinnej: temperatury powietrza, opadów atmosferycznych i zachmurzenia (dane odpowiednio z 45, 50 i 48 stacji IMGW położonych poniżej 300 m n.p.m.). W przypadku promieniowania i usłonecznienia wykorzystano dane odpowiednio z dwóch (Gdynia i Warszawa) oraz czterech punktów pomiarowych (Białystok, Gdynia, Kórnik i Puławy). Dane źródłowe pochodzą z materiałów publikowanych oraz bazy danych IMGW. Szczególną uwagę zwrócono na zmiany zachodzące w drugiej połowie XX wieku oraz na początku XXI wieku. Skalę i kierunek ewolucji warunków termicznych oceniono także na podstawie serii wiekowej 1901-2000. Jakość oraz jednorodność materiału źródłowego oceniono metodami statystycznymi biorąc pod uwagę także *metadane*. Uśrednienie obszarowe zaciera lokalne odchylenia pola danego elementu oraz jest, w pewnym sensie, dodatkowym sposobem minimalizacji ewentualnych skutków niejednorodności ciągów pomiarowych (Brázdil 1986, Fortuniak i in. 2001); korzystanie z tego rodzaju serii jest zalecane w badaniach zmian klimatu (Climate Change 2007). Cyrkulację atmosferyczną opisano wektorem wiatru geostroficznego nad obszarem środkowej części Europy (Degirmendžić i in. 2002, Kożuchowski i Żmudzka 2002).

Do określenia kierunku i tempa zmian średnich miesięcznych, sezonowych i rocznych wartości elementów klimatu wykorzystano trend liniowy (istotność trendu oceniano obliczając statystykę F) oraz test rangowy Manna-Kendalla (Mitchell i in. 1966). Fluktuacje sezonowych i rocznych wartości elementów klimatu opisano na podstawie przebiegów kumulowanych odchyleń od średniej wieloletniej (Drozdov i Grigoreva 1972); do wygładzenia danych zastosowano także średnią ruchomą 10-letnią oraz filtr dwumianowy 5-letni.

Związki elementów klimatu opisano współczynnikiem korelacji Pearsona. Do oceny zależności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych od cyrkulacji atmosferycznej i zachmurzenia wykorzystano analizę regresji wielokrotnej.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wieloletnia zmienność elementów klimatu Polski

W latach 1951-2000 istotne ocieplenie na obszarze Polski wystąpiło wiosną (tab. 1). Pozytywna tendencja zmian temperatury powietrza koresponduje ze znaczącym w tej porze roku wzrostem sum promieniowania całkowitego oraz wzrostem usłonecznienia. W ujęciu miesięcznym dodatnie i istotne statystycznie tendencje zmian temperatury powietrza wystąpiły w marcu i maju. Ocieplenie majowe można wytłumaczyć wzrostem dopływu energii promienistej będącej m. in. konsekwencją ujemnego trendu zachmurzenia. Nieco inaczej sytuacja kształtowała się w marcu – mimo wzrostu wielkości zachmurzenia temperatura znacząco wzrosła. W miesiącu tym, wpływ wielkości zachmurzenia na warunki termiczne jest najsłabszy w ciągu roku i nieistotny statystycznie (tab. 2). Złagodzeniu uległy także zimy (średnia temperatura powietrza w Polsce w ostatnim 10-leciu XX wieku zbliżyła się do wartości 0°C). Jak wykazano, ocieplenie zimowe i wiosenne było głównie skutkiem wzrostu intensywności składowej zachodniej cyrkulacji w umiarkowanych szerokościach geograficznych półkuli północnej (Kożuchowski i Żmudzka 2002, Degirmendžić i in. 2004). Analiza przebiegu wieloletniego średniej rocznej temperatury powietrza w Polsce wskazała, że rosnąca tendencja jej zmian wyraźnie zaznaczyła się po minimum na początku lat 60. (Fortuniak i in. 2001).

Wielkość opadów i zachmurzenia na obszarze Polski po roku 1950. nie wykazały określonego kierunku (istotnego trendu) zmian (Żmudzka 2002, 2003). Niewielki wzrost ilości opadów wystąpił wiosną i jesienią, a zmniejszenie latem i zimą. W przeważającej części roku stwierdzono nieistotne zmniejszenie wielkości zachmurzenia (zimą na granicy istotności statystycznej), tylko jesienią wystąpił nieznaczny jej wzrost.

W miesiącach, w których wystąpiła rosnąca tendencja zmian wielkości zachmurzenia, tzn. w czerwcu i wrześniu, stwierdzono ujemny trend temperatury, dodatni zaś opadów.

Niewielkie oziębienie w czerwcu oraz jesienią można uznać, oprócz ocieplenia zimowo-wiosennego, za cechę charakterystyczną zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku (Kożuchowski i Żmudzka 2001).

Na szczególną uwagę zasługuje ostatnie 20-lecie XX wieku oraz początek wieku XXI, w których nastąpiło wyraźne zwiększenie tempa ocieplenia. Zaznaczyło się ono nie tylko w sezonie zimowo-wiosennym (I-V), ale także w ciepłej porze roku. Wydłużając okres badań do 2006 roku można zauważyć, że tempo wzrostu średniej rocznej temperatury powietrza zwiększyło się z 0,018 do $0{,}020^{o}$C na rok. Wartości średniej rocznej temperatury po roku 1987 (oprócz roku 1996) były wyższe od średniej wieloletniej. Większość z nich, szczególnie tych z lat 90. należała do najwyższych od początku drugiej połowy XX wieku. Średnia

Tabela 1. Współczynniki kierunkowe trendu liniowego *a* oraz ocena rangowa (τ – statystyka Manna-Kendalla) trendu zmian uśrednionych obszarowo miesięcznych, sezonowych i rocznych wielkości zachmurzenia *N* (%·rok^{-1}), usłonecznienia *S* (h·rok^{-1}), temperatury powietrza *t* (^{o}C·rok^{-1}), sum opadów atmosferycznych *R* (mm·rok^{-1}) w Polsce nizinnej w latach 1951-2000 oraz średnich sum promieniowania całkowitego z Gdyni i Warszawy *K*↓ (MJ·m^{-2}·rok^{-1}) w latach 1961-2000 (pogrubiono wartości istotne na poziomie 0,05) (Żmudzka 2007)

Table 1. Directional coefficients of the linear trend *a* and rank statistic (τ – Mann-Kendall statistic) of the trend in changes of the area averaged monthly, seasonal and annual magnitudes of cloud cover *N* (% year^{-1}), sunshine *S* (h year^{-1}), air temperature *t* (^{o}C year^{-1}), and sums of precipitation *R* (mm year^{-1}) in lowland Poland in the years 1951-2000 and average sums of total solar radiation from Gdynia and Warszawa *K*↓ (MJ m^{-2} year^{-1}) in the years 1961-2000 (coefficients significant at the level of 0.05 are marked in bold) (Żmudzka 2007)

Elementy klimatu Climate elements		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	I-XII
N	*a*	–0,10	–0,06	0,07	–0,01	**–0,21**	0,07	–0,06	–0,11	0,18	–0,05	–0,10	–0,04	–0,07	–0,05	–0,03	0,01	–0,04
	τ	–0,16	–0,14	0,06	–0,05	**–0,29**	0,09	–0,06	–0,17	**0,19**	–0,06	–0,16	–0,09	–0,19	–0,12	–0,07	0,01	–0,14
K↓	*a*	0,21	**0,46**	0,21	0,61	**2,65**	–0,98	1,10	1,36	–0,28	0,53	**0,43**	0,17	**0,86**	**3,47**	1,48	0,68	**6,48**
	τ	0,17	0,21	0,08	0,11	**0,36**	–0,14	0,11	0,22	–0,09	0,16	**0,33**	0,19	**0,32**	**0,34**	0,04	0,11	0,26
S	*a*	0,19	0,13	–0,30	0,33	**1,44**	–0,42	0,54	0,65	**–0,68**	0,20	0,21	0,09	0,41	**1,46**	0,77	–0,27	2,37
	τ	0,13	0,09	–0,06	0,10	**0,30**	–0,12	0,05	0,15	**–0,24**	0,04	0,14	0,06	0,16	**0,23**	0,05	–0,08	**0,21**
t	*a*	0,04	0,07	**0,06**	0,03	**0,03**	–0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	–0,02	0,00	0,04	**0,04**	0,00	0,00	0,02
	τ	0,15	0,14	**0,22**	0,12	**0,20**	–0,10	0,00	0,12	–0,05	0,01	–0,07	0,01	0,18	**0,30**	–0,03	–0,09	0,17
R	*a*	–0,06	–0,03	0,27	0,07	–0,02	0,09	–0,18	–0,16	0,21	0,05	–0,03	0,05	–0,03	0,33	–0,24	0,24	0,29
	τ	–0,06	–0,03	0,14	0,01	–0,04	0,05	–0,08	–0,09	0,10	0,02	–0,01	0,02	–0,01	0,12	–0,02	0,09	0,05

Tabela 2. Współczynniki korelacji uśrednionych obszarowo miesięcznych, sezonowych i rocznych wielkości zachmurzenia z całkowitym promieniowaniem słonecznym $r_{K\downarrow}$, usłonecznieniem r_S, temperaturą powietrza r_t i opadami atmosferycznymi r_R w Polsce nizinnej w latach 1951-2000 (pogrubiono wartości istotne na poziomie 0,05) (Żmudzka 2007)
Table 2. Coefficients of linear correlation of the area averaged monthly, seasonal and annual magnitudes of cloud cover with total solar radiation $r_{K\downarrow}$, sunshine r_S, air temperature r_t and precipitation r_R in lowland Poland in the years 1951-2000 (coefficients significant at the level of 0.05 are marked in bold) (Żmudzka 2007)

r	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$r_{K\downarrow}$ *	**–0,74**	**–0,72**	**–0,80**	**–0,89**	**–0,88**	**–0,83**	**–0,93**	**–0,83**	**–0,82**	**–0,86**	**–0,70**	**–0,74**
r_S	**–0,88**	**–0,92**	**–0,94**	**–0,95**	**–0,93**	**–0,92**	**–0,95**	**–0,95**	**–0,92**	**–0,95**	**–0,89**	**–0,88**
r_t	0,24	**0,29**	–0,04	**–0,43**	**–0,57**	**–0,61**	**–0,75**	**–0,61**	**–0,62**	–0,08	–0,02	**0,34**
r_R	**0,58**	**0,61**	**0,60**	**0,71**	**0,75**	**0,77**	**0,84**	**0,72**	**0,80**	**0,76**	**0,44**	**0,62**

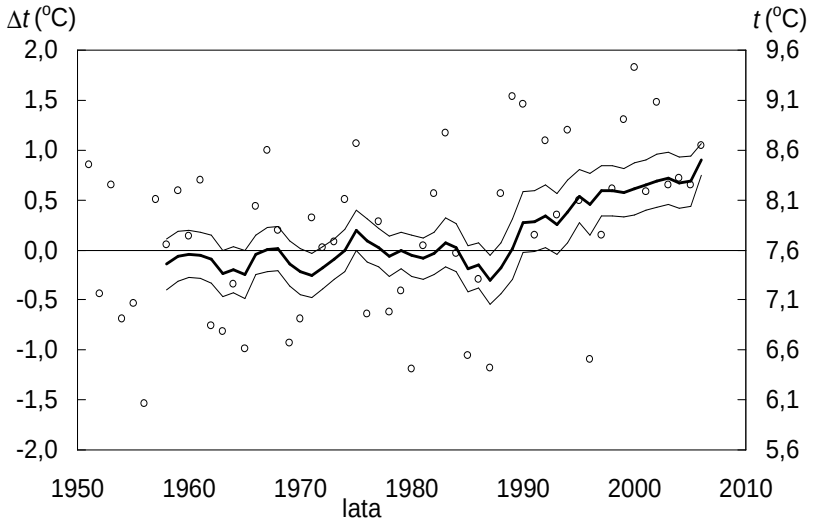
r	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	I-XII
$r_{K\downarrow}$ *	**–0,59**	**–0,80**	**–0,84**	**–0,70**	**–0,61**
r_S	**–0,83**	**–0,90**	**–0,91**	**–0,87**	**–0,74**
r_t	0,23	**–0,34**	**–0,67**	**–0,39**	**–0,41**
r_R	**0,59**	**0,71**	**0,76**	**0,76**	**0,76**

* dane z okresu 1961-2000 – data for the period of 1961-2000.

obszarowa temperatura powietrza czterokrotnie przekroczyła wartość 9°C: w roku 2000 (9,5°C), 1989 (9,2°C) oraz 1990 i 2002 (9,1°C) (rys. 1). Były to najwyższe wartości średniej rocznej temperatury powietrza od początku ubiegłego stulecia.

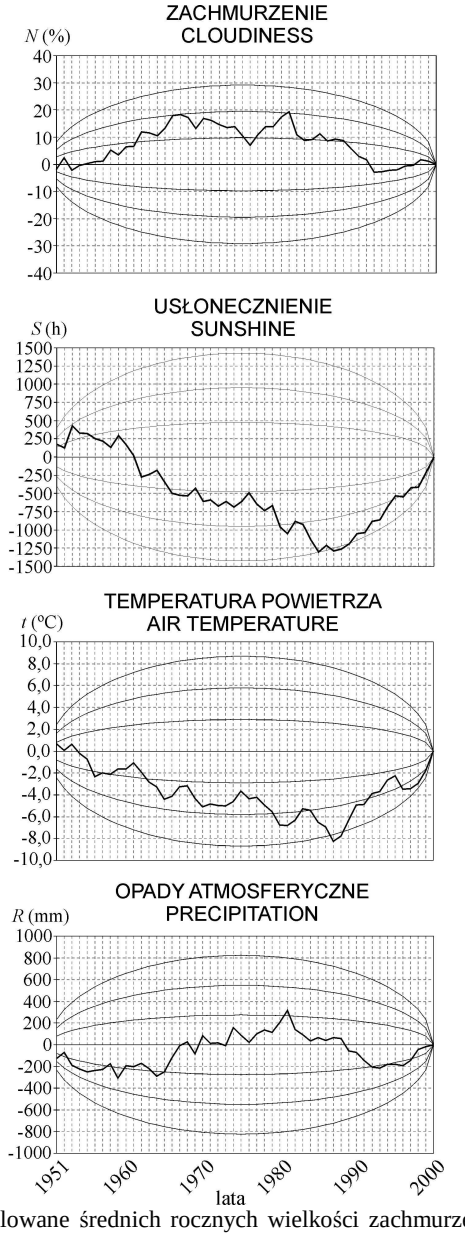
Kształt krzywych przedstawiających kumulowane odchylenia od średnich z wielolecia 1951-2000 w przypadku temperatury powietrza zimą, wiosną i w roku odpowiada trendowi rosnącemu – w pierwszej połowie wielolecia wystąpiła przewaga odchyleń ujemnych, a po 1987 roku dodatnich (rys. 2). Wiosną i w roku kumulowane odchylenia przekraczają wartość 3 odchyleń standardowych, wskazując na występowanie nielosowych fluktuacji w szeregu czasowym. Wieloletni przebieg odchyleń kumulowanych temperatury powietrza wykazuje bardzo duże podobieństwo do przebiegu usłonecznienia i promieniowania. Struktura sezonowa wieloletniego przebiegu opadów była nieco bardziej skomplikowana. Widoczne są jednak wyraźnie, oprócz sezonu zimowego, dwa okresy dominacji odchyleń

ujemnych: lata 50. oraz lata 80. i początek lat 90. oraz dwa – przewagi odchyleń dodatnich: lata 60. i 70. oraz od połowy lat 90. XX wieku. Na szczególną uwagę zasługuje przełom lat 80. i 90. Wystąpił wówczas znaczny wzrost temperatury i zmniejszenie ilości opadów. Zadecydowało to o wystąpieniu okresów posuchy, a nawet suszy. Podobna sytuacja zaznaczyła się także na początku lat 80. (Żmudzka 2004a). Oba te okresy należały także do lat anomalnie pogodnych (Żmudzka 2007). Ogólnie ze względu na wielkość rocznego zachmurzenia i jej zmiany nad obszarem Polski można wyróżnić trzy okresy: do roku 1981 z przewagą odchyleń dodatnich od średniej z 50-lecia, lata 1982-1992 z dominacją ujemnych i po roku 1992 z ponowną przewagą odchyleń dodatnich. Na taki przebieg średniego rocznego zachmurzenia składa się dość skomplikowana struktura zmian wielkości sezonowych. Zwraca uwagę początek lat 70., na który przypada dość wyraźna granica, jeśli chodzi o charakter i kierunek zmian zachmurzenia ogólnego w poszczególnych porach roku.



Rys. 1. Odchylenia (Δ*t*) średniej rocznej temperatury powietrza od średniej wieloletniej 1961-1990 na obszarze Polski (średnia ruchoma 10-letnia). Kółkami zaznaczono średnie roczne wartości temperatury (*t*) w latach 1951-2006

Fig. 1. Deviations (Δ*t*) of annual average air temperature from average in period 1961-1990 on Poland area (moving 10-year average). The circles denote annual averages of temperature (*t*) in years 1951-2006



Rys. 2. Odchylenia kumulowane średnich rocznych wielkości zachmurzenia (*N*), usłonecznienia (*S*), temperatury powietrza (*t*) i sum opadów atmosferycznych (*R*) od średnich 50-letnich 1951-2000 w Polsce (zaznaczono poziom 1, 2 i 3 odchyleń kumulowanych) (Żmudzka 2007, zmienione)
Fig. 2. Cumulative deviations of annual averages of cloudiness (*N*), sunshine (*S*), air temperature (*t*) and precipitation sums (*R*) from the 50-year averages 1951-2000 in Poland (the ranges of one, two and three standard deviations are marked) (Żmudzka 2007, modified)

Zróżnicowanie sezonowe tendencji zmian elementów klimatu uwidoczniło się w zmianie reżimu klimatycznego na obszarze Polski. Zmniejszyła się m. in. roczna amplituda temperatury o 0,03°C na rok (głównie w wyniku wzrostu temperatury najniższej w ciągu roku) i opadów o 0,13 mm na rok, wiosna stała się nieco cieplejsza od jesieni, zmniejszył się stosunek opadów lata do zimy (głównie w wyniku zmniejszenia się ilości opadów letnich).

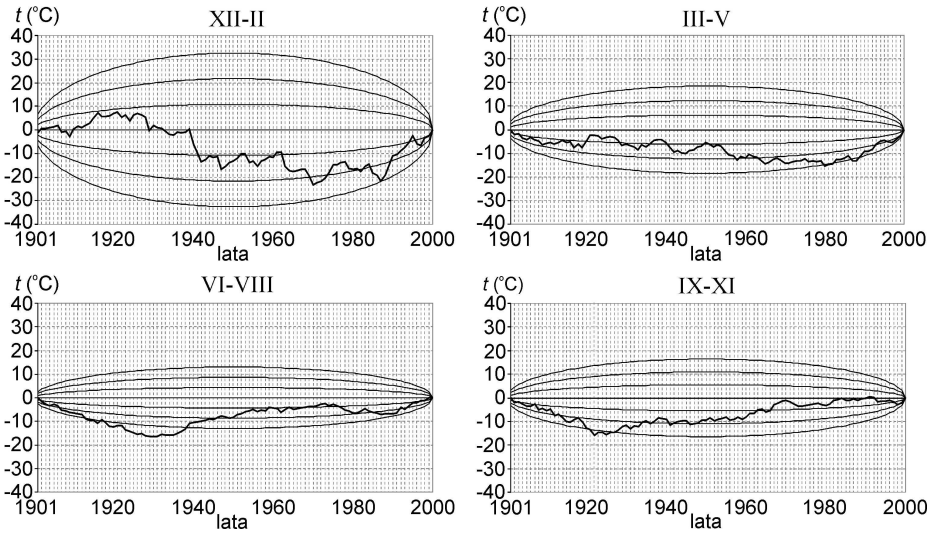
Konsekwencją sezonowo zróżnicowanych tendencji zmian temperatury powietrza były również zmiany terminów rozpoczęcia i zakończenia oraz czasu trwania termicznego okresu wegetacyjnego. Stwierdzono coraz wcześniejsze jego rozpoczynanie się (o 0,23 dnia na rok), ale jednocześnie niewielkiemu przyspieszeniu uległo jego zakończenie (o 0,06 dnia na rok). Czas trwania okresu wegetacyjnego wydłużył się w ciągu 50-lecia o 8 dni. Względnie niewielka, mimo ocieplenia, zmiana jego długości była spowodowana zmianami reżimu termicznego: skróceniu uległa zima, wydłużyły się natomiast przede wszystkim przedwiośnie i przedzimie oraz w niewielkim stopniu wiosna (Kożuchowski i Żmudzka 2001, Fortuniak i in. 2001).

Analiza 100-letniej serii temperatury powietrza wskazała na wystąpienie nielosowych fluktuacji we wszystkich porach roku oprócz zimy (rys. 3). Obraz zmian w latach 1901-2000 w sezonie zimowo-wiosennym i w roku jest podobny do stwierdzonego w drugiej połowie XX wieku. Sygnał ocieplenia pojawił się w roku 1981, a umocnił po roku 1987. Nieco bardziej złożony był natomiast przebieg temperatury latem i jesienią. Główna zmiana znaku tendencji (z ujemnej na dodatnią) wystąpiła jesienią w roku 1923, a latem w roku 1932. Zmiana drugorzędna jesienią wystąpiła pod koniec stulecia – po roku 1992 znów dominowały odchylenia ujemne. Latem zmiana odchyleń z ujemnych na dodatnie wystąpiła ponownie w roku 1989.

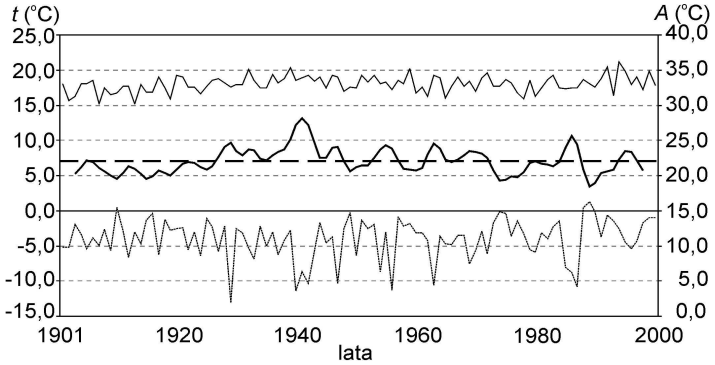
Przebieg amplitudy rocznej temperatury powietrza w okresie 100-letnim wskazał, że pierwsza połowa XX wieku była wyraźnie okresem dwudzielnym: w pierwszym 25-leciu wartości amplitudy były poniżej średniej, w drugim znacznie powyżej (rys. 4). Druga połowa XX wieku charakteryzowała się kilkuletnimi oscylacjami wartości amplitudy wokół średniej.

Geograficzne zróżnicowanie tendencji zmian elementów klimatu na terytorium Polski wpłynęło na ich rozkład przestrzenny. Zmiany poszczególnych elementów klimatu na terytorium Polski w minionym półwieczu były zróżnicowane nie tylko pod względem tempa, ale i kierunku. Jedynie w przypadku temperatury na całym obszarze Polski wystąpiła jednokierunkowa – dodatnia tendencja zmian (Żmudzka 2004b). W wyniku ocieplenia, które zaznaczyło się wyraźniej w regionach ciepłych niż w chłodnej części kraju, kontrasty termiczne na obszarze Polski stały się nieco większe (Fortuniak i in. 2001). Regionem o największym zachmurzeniu stała się środkowa część Pojezierza Pomorskiego, a nie jak we wcześniejszych wieloleciach północno-wschodnie krańce Polski. Widoczne zwiększenie zachmurzenia ogólnego nastąpiło w południowo-zachodniej Polsce (Żmudzka

2007). W rozkładzie przestrzennym rocznych sum opadów nie zaznaczyły się większe różnice w stosunku do rozkładów z wcześniejszych wieloleci.



Rys. 3. Odchylenia kumulowane średnich sezonowych wartości temperatury powietrza (*t*) od średnich 100-letnich 1901-2000 w Polsce (zaznaczono poziom 1, 2 i 3 odchyleń kumulowanych)
Fig. 3. Cumulative deviations of seasonal averages of air temperature values (*t*) from the 100-year averages 1901-2000 in Poland (the ranges of one, two and three standard deviations are marked)



Rys. 4. Najwyższe (———) i najniższe (·····) średnie miesięczne wartości temperatury powietrza (*t*) w Polsce oraz amplituda roczna temperatury (*A*) (———) wyrównana dwukrotnie filtrem dwumianowym 5-letnim. Linią przerywaną zaznaczono amplitudę średnią 100-letnią (1901-2000)
Fig. 4. The highest (———) and the lowest (·····) average monthly air temperature values (*t*) in Poland and the annual amplitudes of temperature (*A*) (———) smoothed twice with binominal 5-year filter. The dotted line denotes the average 100-year amplitude (1901-2000)

Uwarunkowania cyrkulacyjne i nefologiczne zmienności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Polsce

Czynnikiem powodującym znaczną część obserwowanych wahań elementów klimatu jest cyrkulacja atmosferyczna. Ważnym elementem klimatu, któremu przypisuje się jednocześnie duże znaczenie klimatotwórcze, między innymi w modyfikowaniu efektu cieplarnianego atmosfery, jest zachmurzenie. Łącznie te dwa czynniki wyjaśniają do 80% zmienności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych (tab. 3). Od wielkości zachmurzenia istotnie w ciągu całego roku zależy usłonecznienie i ilość dopływającej energii promienistej, których przebieg roczny, jak wiadomo, odzwierciedla zależność tych elementów klimatu od zmieniających się w cyklu rocznym warunków astronomicznych. W ciągu całego roku wzrost wielkości zachmurzenia nad Polską powoduje skrócenie czasu i zmniejszenie dopływu energii promienistej, przy czym wpływ ten jest największy latem (tab. 2). Zachmurzenie modyfikując czynnik insolacyjny znacząco wpływa wówczas na warunki termiczne (związek negatywny). W ciągu całego roku istotne związki z wielkością zachmurzenia łączą także ilość opadów atmosferycznych.

Wykorzystując dane z 40-lecia 1951-1990 określono równania regresji pozwalające oszacować wartości temperatury powietrza i sumy opadów atmosferycznych na podstawie składowych wiatru geostroficznego nad środkową częścią Europy i wielkości zachmurzenia nad Polską. Na podstawie równań dokonano estymacji temperatury i opadów w 10-leciu 1991-2000. Oceny wartości temperatury w Polsce na podstawie składowych wiatru geostroficznego i wielkości zachmurzenia w tym okresie są w przeważającej części roku „za niskie" w porównaniu z wartościami obliczonymi na podstawie danych pomiarowych, co oznacza, że w latach 1991-2000 było cieplej niż wynikałoby to z uwarunkowań nefologiczno-cyrkulacyjnych (tab. 4). Interesujący jest jednak sezonowy rozkład różnic między wartościami estymowanymi a zmierzonymi: „za ciepło" było głównie wiosną i latem, zimą i jesienią było natomiast „za chłodno" (mimo iż zimy były coraz cieplejsze). Wiosna była tą porą roku, w której wystąpiło także za dużo, niż wynikało by to z uwarunkowań cyrkulacyjnych i zachmurzenia, opadów. W pozostałych porach roku i roku sumy opadów estymowane były większe od zmierzonych. Różnice nie są na ogół większe od błędu standardowego estymacji, jednak mogą wskazywać na tendencje zmian elementów klimatu Polski charakterystyczne dla końca XX wieku i przełomu wieku XX i XXI.

Tabela 3. Współczynniki regresji wielokrotnej (*a, b, c*) średniej temperatury powietrza i sum opadów atmosferycznych w Polsce ze składowymi wiatru geostroficznego nad Europą Środkową (V_W, V_N) i średnią wielkością zachmurzenia nad Polską (*N*), 1951-2000 (R^2 – współczynnik determinacji, *F* – wartości testu Fishera, BSE – standardowy błąd estymacji. Równania istotne na poziomie p < 0,05) (Żmudzka 2007)

Table 3. Coefficients of multiple regression (*a, b, c*) of the average air temperature and precipitation sums in Poland with the components of geostrophic wind over Central Europe (V_W, V_N) and average magnitude of cloudiness over Poland (*N*), 1951-2000 (R^2 – coefficients of determination, *F* – values of Fisher test, BSE – standard error of estimate. Equations significant at the level p < 0.05) (Żmudzka 2007)

Miesiąc Pora roku Rok Month Season Year	Temperatura powietrza Air temperature						Opady atmosferyczne Precipitation					
	$a(V_W)$	$b(V_N)$	$c(N)$	R^2	F	BSE	$a(V_W)$	$b(V_N)$	$c(N)$	R^2	F	BSE
I	1,00	–0,56	0,12	0,84	82,3	1,29	0,64	0,90	1,17	0,39	9,92	10,61
II	0,92	–0,50	0,11	0,76	48,02	1,77	1,46	–0,48	0,89	0,51	16,19	8,63
III	0,70	–0,34	–0,06	0,52	16,92	1,74	1,79	–0,01	0,85	0,48	14,44	10,29
IV	0,13	–0,84	–0,08	0,48	14,47	1,15	3,66	–2,99	1,25	0,65	28,75	8,40
V	0,07	–0,80	–0,09	0,49	14,70	1,07	2,21	–7,02	1,71	0,68	32,61	9,94
VI	–0,10	–0,67	–0,11	0,56	19,51	0,78	–3,75	–6,93	2,45	0,71	36,86	11,03
VII	–0,45	–0,54	–0,10	0,68	32,37	0,84	–9,04	–9,69	3,42	0,80	59,88	15,34
VIII	–0,04	–0,48	–0,10	0,46	13,02	0,88	–3,81	–4,28	2,34	0,59	21,67	14,33
IX	0,09	–0,69	–0,07	0,62	25,10	0,83	–0,65	–4,31	2,03	0,68	32,36	12,74
X	0,33	–0,37	0,00	0,34	7,72	1,14	–1,89	–0,76	2,39	0,60	22,82	18,23
XI	0,61	–0,58	0,07	0,45	12,54	1,44	2,62	0,63	1,44	0,37	8,92	12,42
XII	0,76	–0,38	0,12	0,66	29,63	1,37	2,56	–0,49	1,61	0,50	15,67	12,27
XII–II	1,04	–0,59	0,12	0,83	75,29	0,96	4,12	–0,83	3,69	0,46	12,67	19,56
III–V	0,53	–0,50	–0,10	0,40	10,06	0,98	9,41	–7,95	3,92	0,67	30,70	16,88
VI–VIII	–0,21	–0,38	–0,10	0,51	16,12	0,59	–16,89	–10,57	7,82	0,67	30,77	26,46
IX–XI	0,30	–0,60	–0,03	0,47	13,72	0,67	5,90	–4,23	6,73	0,60	23,45	26,74
I–XII	0,80	–0,43	–0,08	0,52	16,60	0,59	20,82	–14,64	22,59	0,60	23,33	50,34

Tabela 4. Odchylenia średnich 10-letnich (1991-2000) wartości temperatury (Δt) i sum opadów (ΔR) w Polsce od średnich z okresu 1951-2000 oraz różnice między estymowanymi i zmierzonymi wartościami temperatury i sumami opadów w latach 1991-2000
Table 4. Deviations of 10-year averages (1991-2000) of temperature values (Δt) and precipitation sums (ΔR) in Poland from averages in period 1951-2000 and differences between the estimated and the measured values of temperature and sums of precipitation in years 1991-2000

Różnice Differences	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Δt (°C)	1,4	1,5	1,0	1,0	0,4	0,1	0,6	0,8	0,1	0,0	–0,5	–0,3
Δt_{est}–t_{zm} (°C)	–1,2	1,0	–0,7	–1,0	–0,4	–0,2	–0,4	–0,7	–0,1	–0,2	0,6	0,4
ΔR (mm)	–3	4	9	3	2	–3	–1	–7	7	1	–4	–1
ΔR_{est}–R_{zm} (mm)	1	1	–9	–4	–7	5	–3	7	3	1	1	–1

Różnice Differences	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	I-XII
Δt(°C)	0,8	0,8	0,5	–0,2	0,5
Δt_{est}–t_{zm} (°C)	0,3	–0,8	–0,5	0,1	–0,4
ΔR (mm)	–1	14	–11	5	7
ΔR_{est}–R_{zm} (mm)	3	–17	9	2	15

PODSUMOWANIE

Syntetyczna ocena współczesnej ewolucji klimatu Polski wskazała na istotne zmiany wartości elementów składających się na obieg ciepła: promieniowania całkowitego, usłonecznienia oraz temperatury powietrza. Na tle postępującego wzrostu wartości tych elementów, wystąpiły znaczące ich fluktuacje. Wiosną i średnio w roku główna zmiana ich wartości nastąpiła w drugiej połowie lat 80. XX wieku, a latem i jesienią na przełomie lat 20. i 30. XX wieku. Ociepleniu, które na ziemiach polskich wyniosło średnio w roku około 0,9°C, nie towarzyszyły istotne zmiany ilości opadów atmosferycznych. Jednak w okresach krótszych, np. na początku lat 80. i na przełomie lat 80. i 90. XX wieku koincydencja znacznego wzrostu temperatury powietrza i wyraźnego zmniejszenia ilości opadów skutkowała wystąpieniem suszy. Zróżnicowane sezonowo i przestrzennie tendencje zmian elementów klimatu uwidoczniły się nieznacznie w ich rozkładzie przestrzennym na obszarze Polski oraz w pewnych oznakach zmiany reżimu klimatycznego. W znacznym stopniu wynika ona z uwarunkowań cyrkulacyjnych i nefologicznych.

PIŚMIENNICTWO

Brázdil R., 1986. Variation of atmospheric precipitation in the CSSR with respect to precipitation changes in the European region. Univerzita J. E. Purkyne, Brno. Rec. J. Trepińska, 1987. Wiadomości IMGW, 10, 4.

Degirmendžić J., Kożuchowski K., Żmudzka E., 2002. Uwarunkowania cyrkulacyjne zmienności temperatury powietrza w Polsce w okresie 1951-2000. Przegląd Geofizyczny, 47, 1-2, 93-98.

Degirmendžić J., Kożuchowski K., Żmudzka E., 2004. Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951-2000 and their relationship to atmospheric circulation. Int. J. Climatol., 24, 3, 291-310.

Drozdov O. A., Grigoreva A. S., 1972. Charakteristika cykličnosti osadkov na teritorii SSSR i svjaz s cykličnostju cyrkulacii atmosfery. Gidrometeoizdat, Leningrad.

Climate Change, 2007. IPCC.

Fortuniak K., Kożuchowski K., Żmudzka E, 2001. Trendy i okresowość zmian temperatury powietrza w Polsce w drugiej połowie XX wieku. Przegląd Geofizyczny, 46, 4, 283-303.

Kożuchowski K., Żmudzka E, 2001. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. Przegląd Geofizyczny, 46, 1-2, 81-90.

Kożuchowski K, Żmudzka E., 2002. Cyrkulacja atmosferyczna i jej wpływ na zmienność temperatury powietrza w Polsce. Przegląd Geograficzny, 74, 4, 591-604.

Mitchell J. M., Dzerdzeevskii B., Flohn H., Hofmeyr W. L., Lamb H. H., Rao K. N., Wallen C. C., 1966. Climatic change. Technical Note, 79, WMO.

Żmudzka E., 2002. O zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Polski nizinnej w drugiej połowie XX wieku. Wiadomości IMGW, 25, 4, 23-38.

Żmudzka E., 2003. Les conditions de circulation propres à la variabilité de la nébulosité en Pologne, en 1951-2000. Dokumentacja Geograficzna IGiPZ PAN, 29, 379-382.

Żmudzka E., 2004a. Tło klimatyczne produkcji rolniczej w Polsce w drugiej połowie XX wieku. Acta Agrophysica, PAN, 105, 3(2), 399-408.

Żmudzka E., 2004b. Tendencje zmian a zróżnicowanie przestrzenne elementów klimatu w Polsce w drugiej połowie XX wieku. W: Badania geograficzne w poznawaniu środowiska (Red. Z. Michalczyk). Wydawnictwo UMCS, Lublin, 452-458.

Żmudzka E., 2007. Zmienność zachmurzenia nad Polską i jej uwarunkowania cyrkulacyjne (1951-2000). Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

CONTEMPORARY CHANGES OF CLIMATE OF POLAND

Elwira Żmudzka

Department of Climatology Institute of Physical Geography,
Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
e-mail: elwiraz@uw.edu.pl

Abstract. The paper presents the results of research of temporal variability of the climate elements in Poland. An attempt at preliminary assessment of the role of cloudiness and atmospheric circulation in shaping the climate of Poland was also undertaken. The spatially averaged series of climate elements from terrain of lowland Poland were used first of all. The considered data covered the second-half of the 20th century and the beginning of the 21st century, and in the case of the air

temperature also 100-year series of 1901-2000. In the study analysis of correlation and simple and multiple regression was used. Significant changes of value of climate elements resulting in the circulation of warmth were demonstrated. In the second half of the 20th century non-random fluctuations in the radiation, sunshine and temperature appeared in spring and on average in the year. Analysis of 100-year series of air temperatures showed significant changes in all seasons except the winter. In the case of average seasonal precipitation sums and cloudiness significant changes did not appear. It was demonstrated that with the direct influence of the circulation and magnitude of cloudiness it is possible to explain up to the 80% to the variability of air temperature and precipitations. In the last 10-year period of the 20th century, spring and summer were "too warm" than it would result from the circulatory conditions and from cloudiness, while winter and autumn were "too cold" (even though winters were more and more warm). Tendencies of climate elements changes diversified seasonally and spatially were seen slightly in their spatial layout in the area of Poland and in certain indications of the change of the climatic regime.

Keywords: climate elements, changes, atmospheric circulation, relationship, Poland