

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 148, 2017, 33–54

doi: 10.4467/20833113PG.17.002.6270

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

## MIESIĘCZNE ANOMALIE TERMICZNE NA ALASCE (1951–2015)

*Agnieszka Sulikowska*

### Monthly air temperature anomalies in Alaska (1951–2015)

*Abstract:* The aim of this paper is to present both anomalously warm months (AWM) and anomalously cold months (ACM) in Alaska and to refine the linkage of Pacific Decadal Oscillation (PDO) with their occurrence. The study is based on mean monthly temperature data from 15 weather stations located in Alaska recorded during the period of 1951–2015. The anomalous months were defined as having an average temperature different from the long-term mean by at least 2 standard deviations. Temporal variability, spatial extent and temperature magnitude of AWM and ACM were characterized.

In total (considering all 15 stations), there were 243 cases of AWM and 298 cases of ACM, which occurred during 100 and 123 months of the 65-year period respectively. AWM occurred most frequently in January and from June to August while ACM from February to April and in November and December. To some degree months with the biggest number of AWM were the same as months with the smallest number of ACM and vice versa. This indicates that during particular months synoptic and/or local conditions may be more favourable for the occurrence of positive or negative anomalies. Both AWM and ACM covered from 1 to 11 weather stations simultaneously, though the majority of the anomalous months of each type were observed at single stations or at two neighboring stations. Generally, the scale of the anomaly tended to be larger during ACM than AWM (i.e. down to  $-17,0^{\circ}\text{C}$  compared to maximum  $15,6^{\circ}\text{C}$  for AWM), during winter than summer, and in the central part of Alaska than at the seaside. There is a clearly visible increase in the frequency of AWM and a decrease in the frequency of ACM after 1976 when PDO shifted from dominantly negative to positive values. Comparing two periods, 1951–1976 and 1977–2015, one can notice that in the latter the mean annual number of ACM in Alaska decreased by one-third and the

mean annual number of AWM doubled. The spatial extent of ACM was also considerably smaller (on average) and of AWM – larger. In total about 80% of AWM (ACM) occurred during the positive (negative) values of PDO index.

Monthly temperature anomalies in Alaska are mainly driven by atmospheric circulation patterns. AWM coincide with advection of warm air masses from the south while ACM tend to occur in association with northern cold advections. Local effects, which include radiative cooling, temperature inversions and local winds (i.e. chinook), also have a great contribution to the occurrence of anomalous months in Alaska.

*Keywords:* thermal anomaly, Pacific Decadal Oscillation, Alaska

*Zarys treści:* Celem pracy jest ocena częstości występowania anomalnie ciepłych i zimnych miesięcy w stanie Alaska w latach 1951–2015, poznanie ich zasięgu przestrzennego, a także próba określenia roli Dekadowej Oscylacji Pacyficznej (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO) w ich pojawianiu się. Opracowanie oparto na średnich miesięcznych wartościach temperatury powietrza z 15 stacji meteorologicznych. Za anomalnie termicznie uznano te miesiące, w których średnia miesięczna temperatura powietrza była wyższa (miesiąc anomalnie ciepły, ACM) lub niższa (miesiąc anomalnie zimny, AZM) od średniej wieloletniej przynajmniej o dwa odchylenia standardowe. Stwierdzono 243 przypadki ACM i 298 AZM. Anomalie były największe w chłodnej połowie roku i w obszarach w zasięgu klimatu kontynentalnego, a najmniejsze w ciepłej połowie roku i w obszarach o klimacie morskim. W przebiegu wieloletnim wystąpił spadek częstości AZM i wzrost częstości ACM, co – jak wykazały badania – ma związek ze zmianą fazy PDO z ujemnej na dodatnią w 1976 r. Na szczególną uwagę zasługują ostatnie trzy lata okresu badań, charakteryzujące się dużą liczbą ACM o dużym zasięgu. Podczas ok. 80% ACM (AZM) wartości wskaźnika PDO były dodatnie (ujemne), co potwierdza, że PDO jest jednym z głównych czynników warunkujących występowanie miesięcy anomalnych pod względem termicznym na tym obszarze. Duże znaczenie mają również uwarunkowania lokalne poszczególnych stacji.

*Słowa kluczowe:* anomalia termiczna, Dekadowa Oscylacja Pacyficzna, Alaska

## Wstęp

Alaska – dzięki dużej powierzchni (1 525 953 km<sup>2</sup>) i rozciągłości południkowej oraz strefowej, rozwiniętej linii brzegowej z jednej strony, a z drugiej dzięki obecności zwartej części kontynentu północnoamerykańskiego, a także bardzo urozmaiconej rzeźbie terenu – jest obszarem o ogromnym zróżnicowaniu klimatycznym (Shulski, Wendler 2007). Wielu autorów dokonywało podziału Alaski na regiony klimatyczne, wyróżniając od kilku do kilkunastu jednostek (Stafford i in. 2000; Hartmann, Wendler 2005a; Shulski, Wendler 2007; Bieniek i in. 2012). Wszyscy wymienieni autorzy wydzieliли – spośród innych – mroźny obszar arktyczny, charakteryzujące się wybitnym kontynentalizmem klimatu wewnątrz stanu, pozostające pod wpływem sezonowo zamarzającego morza wybrzeże zachodnie oraz najcieplejszą, południowo-wschodnią część Alaski.

Anomalia termiczna to duże i rzadko występujące odchylenie temperatury powietrza od średniej wieloletniej (Warakomski 1989/1990). Naprzemienne pojawianie się okresów z wyjątkowo wysoką lub niską temperaturą powietrza w strefie średnich i wysokich szerokości geograficznych jest cechą klimatu związaną z dużą zmiennością pogody, ale długotrwałe utrzymywanie się takich warunków termicznych jest zjawiskiem niezwykłym i może wpływać na środowisko przyrodnicze, gospodarkę, a także na zdrowie i życie ludzi i zwierząt. Miesiące anomalne pod względem termicznym były przedmiotem badań w Europie Środkowej i Wschodniej (Kossowska-Cezak, Twardosz 2012) oraz w strefie klimatu podbiegunowego obszaru atlantycko-europejskiego (Twardosz, Kossowska-Cezak 2013b). Anomalnie zimne miesiące na Alasce były natomiast przedmiotem badań autorki (Sulikowska 2015), a niniejsze opracowanie stanowi ich rozszerzenie i kontynuację.

Cyrkulacja atmosferyczna i temperatura powierzchni mórz są głównymi czynnikami kształtującymi zmienność temperatury powietrza w obszarach średnich i wysokich szerokości geograficznych (Zblewski, Marsz 2010; Maszewski 2011; Twardosz, Kossowska-Cezak 2013a, Wendler i in. 2012). Dekadowa Oscylacja Pacyficzna (*Decadal Pacific Oscillation*, PDO), której wpływ na klimat Alaski został pierwszy raz stwierdzony pod koniec XX w. (Mantua i in. 1997), jest obecnie najczęściej wymienianym przez badaczy czynnikiem wpływającym na temperaturę powietrza w tym obszarze (Papineau 2001; Hartmann, Wendler 2005b; Wendler, Shulski 2009; Shulski i in. 2010; Wendler i in. 2012, 2016). Jest to wskaźnik opisujący miesięczne anomalie termiczne powierzchniowych wód środkowej części północnego Pacyfiku, które występują w cyklu 20–30-letnim. PDO zwykle przyjmuje wartości od  $-3,0$  (faza ujemna) do  $3,0$  (faza dodatnia). Podczas fazy dodatniej temperatura powierzchniowych wód w Zatoce Alaska jest anomalnie ciepła, a ciśnienie atmosferyczne jest niższe od średniego. Podczas fazy ujemnej jest odwrotnie. W wyniku cyrkulacji atmosferycznej temperatura powietrza na Alasce jest stosunkowo wysoka podczas dodatniej i niska podczas ujemnej fazy PDO (Papineau 2001; Hartmann, Wendler 2005b).

Od końca XIX w. na Ziemi obserwowany jest wzrost temperatury powietrza (IPCC 2013), szczególnie szybki w wysokich szerokościach geograficznych półkuli północnej (ACIA 2004, AMAP 2011, Walsh i in. 2011). W Arktyce bardzo ciepły był przełom wieków XX i XXI (Przybylak 2007; AMAP 2011; Walsh i in. 2011). Ocieplenie klimatu w drugiej połowie XX w. zostało stwierdzone także na Alasce, a jego przyczyn wielu badaczy upatruje w zmianie fazy PDO z ujemnej na dodatnią w 1976 r. (Stafford i in. 2000; Hartmann, Wendler 2005b; Wendler, Shulski 2009; Bieniek i in. 2014; Wendler i in. 2016). Jednym ze skutków ocieplenia jest wzrost częstości fal ciepła i spadek częstości fal chłodu po 1980 r. (Peterson i in. 2013), a projekcje na przyszłość przewidują kontynuację tych tendencji w tym obszarze (Bennett, Walsh 2015). W latach 2000–2010 stwierdzono jednak trend spadkowy temperatury powietrza na Alasce (z wyjątkiem jej części arktycznej), co Wendler

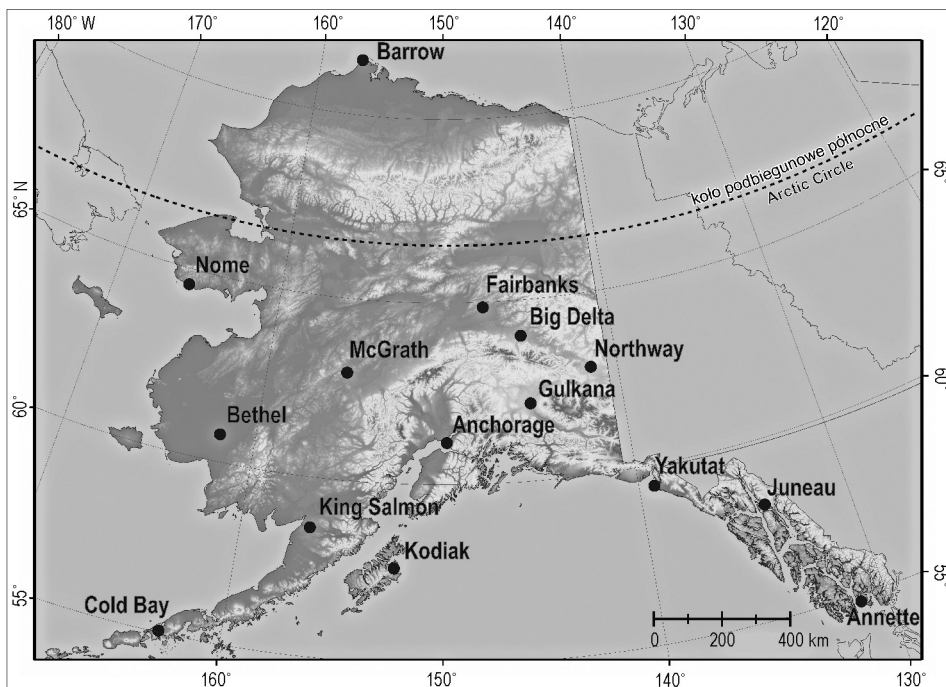
i in. (2012) oraz Bieniek i in. (2014) tłumaczą zmianą fazy PDO z dodatniej na ujemną. Badania zimowych anomalii termicznych na Alasce prowadził Papineau (2001), który określił sumaryczny wpływ Oscylacji Południowej (*Southern Oscillation Index*, SOI), PDO i wskaźnika pacyficzno-północnoamerykańskiego (*Pacific/North American pattern*, PNA) na ich występowanie. Shulski i in. (2010) szczegółowo opisali dwa przypadki anomalii trwających ponad miesiąc (cieplej w 2002 r. i zimniej w 2007 r.), a ich pojawienie się powiązali ze zmiennością PDO. Poza cyrkulacją atmosferyczną na występowanie długotrwałych anomalii termicznych mają wpływ uwarunkowania lokalne, np. utrzymywaniu się silnych mrozów na Alasce sprzyjają często występujące w kotlinach śródgórskich przyziemne inwersje termiczne (Papineau 2001; Shulski i in. 2010). Ich wpływ na średnią temperaturę powietrza oraz jego zanieczyszczenie był przedmiotem szczegółowych badań w Fairbanks (Hartmann, Wendler 2005a).

Celem tego opracowania jest ocena częstości występowania anomalnie ciepłych (ACM) i zimnych (AZM) miesięcy w stanie Alaska w latach 1951–2015, poznanie ich zasięgu przestrzennego, a także próba określenia roli PDO w ich pojawianiu się.

## Dane i metody opracowania

Podstawą opracowania są średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w latach 1951–2015 z 15 stacji meteorologicznych położonych na Alasce, z których większość to stacje nizinne (do 300 m n.p.m.) (ryc. 1). Dane dobowe, z których obliczono wartości średnie miesięczne, pozyskano z amerykańskiej bazy National Climatic Data Center (NCDC). Zgodnie z zapisem *metadata* są one poddawane procedurze oceny jakości (*Quality Control*, QC) ([http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/GSOD\\_DESC.txt](http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/GSOD_DESC.txt), 22.06.2016). Przeprowadzony test homogeniczności *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) wykazał względną jednorodność serii (Alexandersson 1986). Wartości wątpliwe zweryfikowano na podstawie bieżącej sytuacji synoptycznej (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>, 22.06.2016), a także porównano z wynikami innych autorów (Fischer, Prechtel 1981; Tanaka, Milkovich 1990; Papineau 2001; Wendler, Shulski 2009; Shulski i in. 2010). Braki danych (0,75% wszystkich miesięcy) uzupełniono metodą stałości różnic (Kossowska-Cezak i in. 2000). W opracowaniu wykorzystano także miesięczne wartości wskaźnika PDO, które pobrano ze strony internetowej Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (<http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>, 05.01.2016). Dane te były już stosowane w opracowaniu dotyczącym anomalii termicznych na Alasce (Shulski i in. 2010).

Za miesiące anomalne pod względem termicznym uznano te, w których średnia temperatura powietrza ( $t$ ) była różna od średniej wieloletniej (1951–2015) o co



Ryc. 1. Stacje meteorologiczne uwzględnione w opracowaniu

Fig. 1. Weather stations included in the study

Źródło: według Shulski, Wendler (2007).

Source: according to Shulski, Wendler (2007).

najmniej 2 odchylenia standardowe ( $2\sigma$ ). Wyróżniono miesiące anomalnie ciepłe (ACM,  $t \geq t_{sr} + 2\sigma$ ) i anomalnie zimne (AZM,  $t \leq t_{sr} - 2\sigma$ ). Kryterium odchylenia standardowego do wyznaczania miesięcznych i sezonowych anomalii termicznych było stosowane przez wielu autorów (Papineau 2001; Shulski i in. 2010; Twardosz, Kossowska-Cezak 2013a, b).

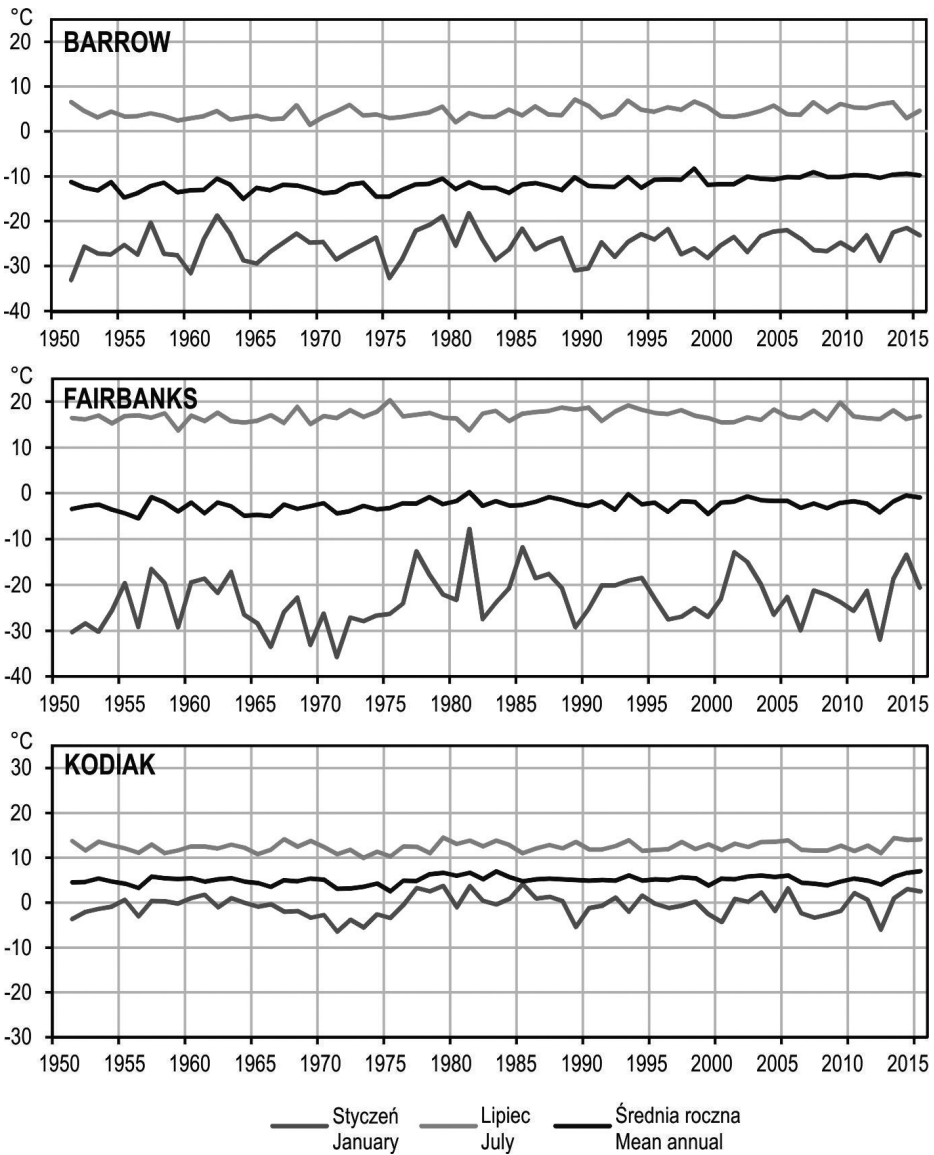
W pierwszej kolejności oceniono zmienność warunków termicznych na Alasce za pomocą regresji liniowej. Następnie zbadano częstość występowania ACM i AZM oraz ich przypadków na poszczególnych stacjach. Określono także wielkości anomalii rozumianych jako odchylenie miesięcznej temperatury powietrza od średniej wieloletniej (1951–2015). Zależność temperatury powietrza od PDO określono za pomocą współczynnika korelacji, a istotność statystyczną badanych trendów oceniono za pomocą testu *t*-studenta (Von Storch, Zwiers 2002).

## Zmiany temperatury powietrza na Alasce (1951–2015)

W przebiegu średniej rocznej temperatury powietrza widoczne są pewne cechy wspólne dla niemal całej Alaski lub w poszczególnych jej regionach. Na ryc. 2 przedstawiono przebieg średniej temperatury powietrza w styczniu, lipcu oraz rocznej na trzech stacjach reprezentujących obszar arktyczny (Barrow), znajdujące się w zasięgu klimatu kontynentalnego wewnątrz stanu (Fairbanks) oraz wybrzeże południowe (Kodiak). Na wszystkich uwzględnionych stacjach mniej lub bardziej wyraźnie zaznaczyła się zmiana temperatury powietrza ok. 1976 r. (na wykresach widoczna zarówno w przebiegu temperatury średniej rocznej, jak i w styczniu), co było związane ze zmianą fazy PDO z ujemnej na dodatnią (Hartmann, Wendler 2005b). Po niej nastąpił ciepły okres, który trwał co najmniej do końca XX w. Pierwsze lata XXI w. były ciepłe, ale 10-lecie 2001–2010 charakteryzowało się silną tendencją spadkową temperatury powietrza na wszystkich stacjach poza Barrow, co potwierdzają badania innych autorów (Wendler i in. 2012; Bieniek i in. 2014). Stacja ta jako jedyna charakteryzowała się stałym trendem wzrostowym temperatury powietrza w całym okresie badań. Po 2010 r. jako wyjątkowo chłodny zaznaczył się rok 2012, ale następne lata były stosunkowo ciepłe. Warto zwrócić uwagę na duże różnice w zmienności temperatury powietrza w styczniu w różnych regionach – największe wahania charakteryzowały stację położoną w zasięgu klimatu kontynentalnego (ryc. 2).

Średnia roczna temperatura powietrza na Alasce charakteryzowała się trendem dodatnim, który na poszczególnych stacjach wyniósł od  $0,1^{\circ}\text{C}$  do  $0,5^{\circ}\text{C}/10$  lat (tab. 1). Zmiana ta była nieistotna statystycznie jedynie w Cold Bay i Kodiak, a najszybciej ocieplenie postępowało w Barrow i McGrath. W ciągu roku największym wzrostem temperatury powietrza cechował się grudzień (do  $1,1^{\circ}\text{C}/10$  lat w McGrath; zmiana istotna statystycznie na 10 stacjach), styczeń i luty (do  $1,0^{\circ}\text{C}/10$  lat w Northway i Barrow; zmiana istotna statystycznie na pięciu stacjach). W kwietniu i maju wartości trendu były mniejsze ( $0,1^{\circ}\text{C}$ – $-0,7^{\circ}\text{C}/10$  lat), ale istotne statystycznie aż na 11 stacjach. Najmniejszym ociepleniem charakteryzował się okres od czerwca do sierpnia (do  $0,3^{\circ}\text{C}/10$  lat). W niektórych miesiącach na pojedynczych stacjach wystąpiły ujemne wartości trendu średniej temperatury powietrza, nigdzie jednak zmiany te nie były istotne statystycznie.

W związku z przedstawionymi tendencjami zmian średniej miesięcznej i rocznej temperatury powietrza na Alasce można się spodziewać wzrostu częstości ACM przy równoczesnym spadku częstości AZM.



Ryc. 2. Przebieg średniej temperatury powietrza (°C) w styczniu, lipcu i rocznej na wybranych stacjach na Alasce (1951–2015)

Fig. 2. Multi-annual variability of air temperature (°C) in January, July and annual at selected stations in Alaska (1951–2015)

Tab. 1. Średnia wieloletnia temperatura powietrza na poszczególnych stacjach na Alasce w styczniu, lipcu i roczna oraz wartości współczynnika  $R^2$  i trendu średniej rocznej temperatury powietrza obliczonego za pomocą regresji liniowej (1951–2015); wartości istotne statystycznie na poziomie  $p=0,05$ , n.s. – zmiana nieistotna statystycznie

Table 1. Average air temperature at 15 stations in Alaska in January, July, annual and annual temperature trend estimation (linear regression) (1951–2015); values statistically significant at the 0.05 level, n.s. – statistically not significant

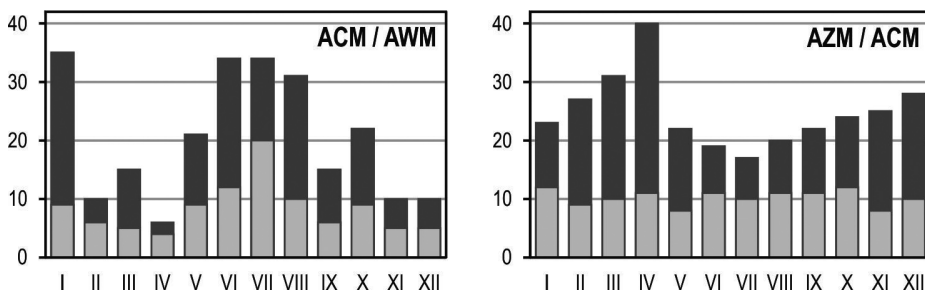
Stacja Station	Temperatura powietrza (°C) Air temperature (°C)			$R^2$	Współczynnik regresji (°C/10 lat) Regression coefficient (°C/10 years)
	I January	VII July	Rok Annual		
Annette	1,9	14,3	7,8	0,169	0,20 ± 0,06
Cold Bay	-1,6	10,0	3,6	0,049	n.s.
Kodiak	-0,6	12,4	5,0	0,041	n.s.
Juneau	-3,4	13,4	5,1	0,280	0,29 ± 0,06
King Salmon	-9,3	12,6	1,3	0,172	0,33 ± 0,10
Yakutat	-3,1	12,4	4,4	0,140	0,22 ± 0,07
Bethel	-14,3	12,9	-1,3	0,159	0,30 ± 0,09
Anchorage	-9,0	14,8	2,6	0,161	0,25 ± 0,08
Gulkana	-20,3	14,4	-2,3	0,215	0,28 ± 0,07
McGrath	-22,5	15,1	-3,1	0,364	0,49 ± 0,09
Northway	-27,2	15,2	-4,9	0,224	0,33 ± 0,08
BigDelta	-19,3	15,8	-1,7	0,178	0,32 ± 0,09
Nome	-14,3	11,0	-2,7	0,112	0,25 ± 0,09
Fairbanks	-23,2	16,9	-2,6	0,156	0,28 ± 0,08
Barrow	-25,4	4,3	-11,8	0,370	0,50 ± 0,09



## Miesiące anomalnie ciepłe i zimne (ACM i AZM)

### Częstość ACM i AZM

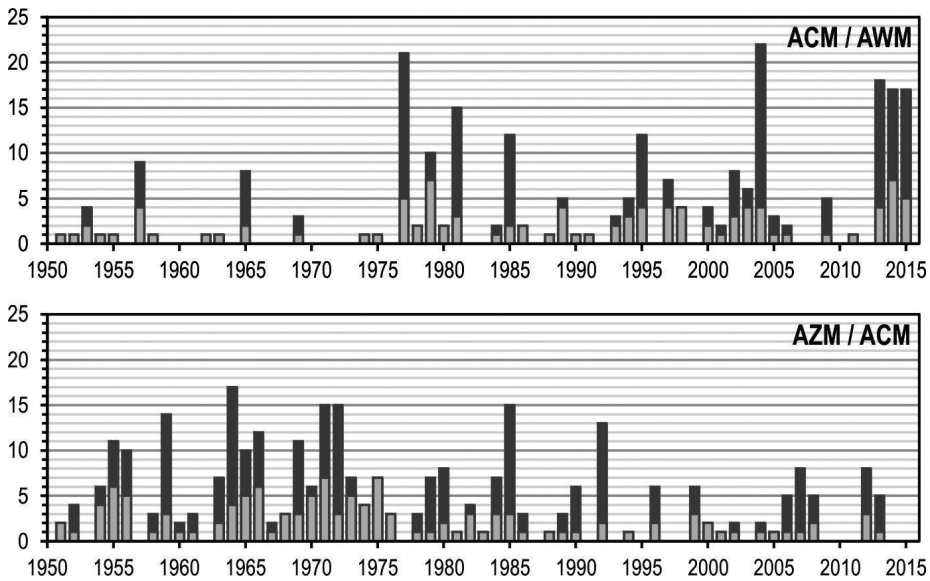
W latach 1951–2015 łącznie na 15 stacjach były 243 przypadki ACM i 298 przypadków AZM, które wystąpiły odpowiednio podczas 100 i 123 miesięcy rozpatrywanego 65-lecia. Najwięcej ACM było w lipcu (20), a częstość AZM była zbliżona we wszystkich miesiącach (ok. 10) (ryc. 3). Nieco inaczej wygląda przebieg roczny liczby przypadków ACM i AZM (ryc. 3), co wynika z różnej liczby stacji, jakie były w zasięgu poszczególnych miesięcy anomalnych termicznie. Najwięcej przypadków ACM było w skrajnych miesiącach roku – styczniu i lipcu, przy czym 41% wszystkich pojawiło się latem (VI–VIII). Przypadków AZM najwięcej było na przełomie zimy i wiosny (II–IV, 33%) oraz na początku zimy (ryc. 3). Duża liczba przypadków ACM w styczniu i AZM w kwietniu oznacza, że obejmowały one znaczny obszar (średnio ok. cztery stacje). Warto zauważyć, że nie ma jednoznacznego związku między miesiącami charakteryzującymi się największym ociepleniem a miesiącami z największą liczbą ACM. Ogólnie ACM częściej pojawiały się we wnętrzu Alaski, rzadziej w obszarach o klimacie morskim. Największą ich liczbą cechowały się stacje Anchorage, Gulkana i Barrow (odpowiednio 23, 22 i 18). W wypadku AZM brak takiej prawidłowości – najwięcej ich było w położonym na Półwyspie Alaska Cold Bay (27) i w środkowej Alasce (Fairbanks – 25; Northway, Big Delta – po 23).



Ryc. 3. Liczba miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i anomalnie zimnych (AZM) (jasnoszary) oraz przypadków ACM i AZM (ciemnoszary) w kolejnych miesiącach łącznie na 15 stacjach na Alasce (1951–2015)

Fig. 3. Number of anomalously warm (AWM) and anomalously cold (ACM) months (light grey) and number of cases of AWM and ACM (dark grey) in particular months at 15 stations in Alaska (1951–2015)

Liczba ACM i AZM łącznie na 15 stacjach w poszczególnych latach wahała się od 0 do 7, a liczba przypadków od 0 do 22 ACM (2004) i od 0 do 17 AZM (1964) (ryc. 4). W przebiegu wieloletnim widoczny jest wzrost częstości ACM i spadek AZM (także liczby przypadków), które nawiązują do zmiany fazy PDO z ujemnej na dodatnią w 1976 r. W okresie 1951–1976 występowały średnio 3 AZM i mniej niż 1 ACM rocznie (odpowiednio 7 i 1 przypadków), w latach zaś 1977–2015 średnio w roku pojawiał się 1 AZM i 2 ACM (odpowiednio 3 i 5 przypadków). W drugim z rozpatrywanych okresów wystąpiło aż 82% wszystkich ACM (86% przypadków). Spadek temperatury powietrza w latach 2000–2010 (Wendler i in. 2012; Bieniek i in. 2014) słabo zaznaczył się w przebiegu liczby ACM i AZM (ryc. 4). Według cytowanych autorów był on najsilniejszy zimą na stacjach położonych na południo-zachodzie Alaski, ale AZM, które wystąpiły w tym okresie, pojawiły się wiosną i jesienią, a najwięcej ich było w środkowej części stanu. Szczególna uwaga należy się natomiast wyróżniającemu się na tle wielolecia okresowi 2013–2015, w którym



Ryc. 4. Przebieg wieloletni liczby miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i anomalnie zimnych (AZM) (jasnoszary) oraz przypadków ACM i AZM (ciemnoszary) łącznie na 15 stacjach na Alasce (1951–2015)

Fig. 4. Multi-annual variation of the number of anomalously warm (AWM) and anomalously cold (ACM) months (light grey) and cases of AWM and ACM (dark grey) at 15 stations in Alaska (1951–2015)

następowały po sobie lata z dużą liczbą ACM (ryc. 4). Razem było ich 16, a znaczna liczba przypadków (razem 52) oznacza, że obejmowały one swoim zasięgiem co najmniej kilka stacji (średnio ponad trzy).

W poszczególnych latach na danej stacji ACM i AZM w zdecydowanej większości występowały pojedynczo. Najwięcej w roku wystąpiło ich pięć – ACM w Cold Bay w 2014 r., AZM w Kodiak w 1975 r. Miesiące te utworzyły dwa najdłuższe (4-miesięczne) ciągi kolejnych ACM i AZM. Poza nimi w latach 1951–2015 wystąpiło 18 ciągów ACM i 11 ciągów AZM. Większość, bo aż 25, to ciągi 2-miesięczne, przy czym należy zauważyć, że AZM częściej tworzyły ciągi dłuższe niż ACM. Godny uwagi jest ciąg ACM w 2004 r. (VII i VIII), który wystąpił aż na czterech stacjach (Anchorage, Bethel, King Salmon, Gulkana). Skutkiem wysokiej temperatury powietrza oraz suszy były samoistne pożary lasów, które objęły głównie środkową Alaskę. Latem 2004 r. w całym stanie spłonęło ponad 26 300 km<sup>2</sup> lasów (Shulski, Wendler 2007). Wszystkie ciągi ACM, poza dwoma, wystąpiły po zmianie fazy PDO z ujemnej na dodatnią w 1976 r. i podczas dodatnich wartości tego wskaźnika. Odwrotnie ciągi AZM, z których wszystkie, z jednym tylko wyjątkiem, pojawiły się przed 1976 r. i podczas ujemnych wartości PDO. Można więc wnioskować, że uwarunkowania cyrkulacyjne wyrażone tym wskaźnikiem wpływają nie tylko na wzrost częstości występowania ACM i AZM, ale także na bardziej długotrwałe utrzymywanie się anomalnych warunków termicznych.

## Zasięg przestrzenny ACM i AZM

Zarówno ACM, jak i AZM obejmowały od jednej do 11 stacji, ale większość z nich wystąpiła na pojedynczych stacjach (tab. 2). Pod tym względem wyróżnia się

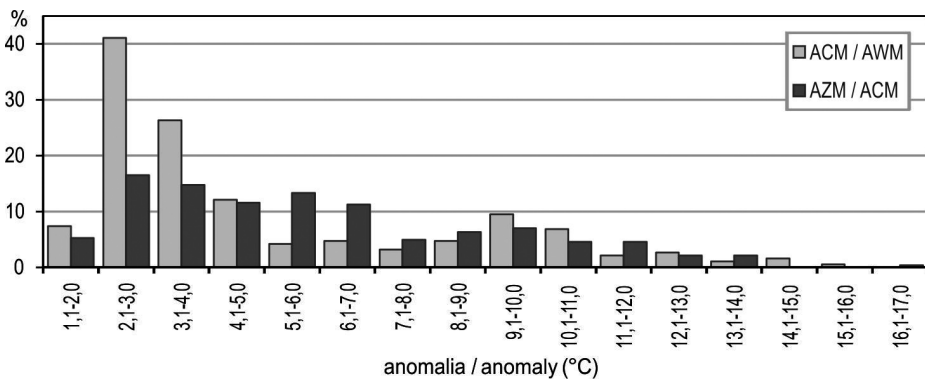
Tab. 2. Liczba (N) i udział procentowy (%) miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i anomalnie zimnych (AZM) występujących jednocześnie na określonej liczbie stacji na Alasce (1951–2015)  
Table 2. Number (N) and percentage (%) of anomalously warm (AWM) and anomalously cold (ACM) months occurring simultaneously at a given number of stations in Alaska (1951–2015)

Miesiące Months		Liczba stacji Number of stations										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ACM AWM	N	53	17	11	3	4	3	2	6	–	–	1
	%	53	17	11	3	4	3	2	6	–	–	1
AZM ACM	N	65	20	14	5	6	4	4	2	–	1	2
	%	53	16	11	4	5	3	3	2	–	1	2

arktyczne Barrow (11 ACM i 15 AZM), a w przypadku AZM także Cold Bay (12). Stosunkowo dużo ACM i AZM wystąpiło także na dwóch lub trzech stacjach równocześnie, które w większości były stacjami sąsiadującymi, więc na ich wystąpienie mogły mieć wpływ czynniki regionalne lub lokalne. ACM i AZM o dużym zasięgu (co najmniej siedem stacji) najczęściej obejmowały stacje położone w zasięgu klimatu kontynentalnego, rozszerzając się czasem na inne regiony Alaski. Warto zauważyć, że większość ACM o dużym zasięgu wystąpiła po zmianie fazy PDO z ujemnej na dodatnią, AZM obejmujące ponad połowę stacji występowały natomiast z podobną częstością przed i po 1976 r.

### Wielkość anomalii temperatury powietrza

Zakres wielkości anomalii temperatury powietrza podczas ACM i AZM był podobny (od 1,1°C do 15,6°C i od -1,1°C do -17,0°C), ale podczas ACM znacznie częściej występowały anomalie o mniejszych, a podczas AZM o większych wartościach (ryc. 5). Niezależnie od znaku anomalii największe odchylenia temperatury powietrza od średniej występowały zimą (XII–II), a najmniejsze latem (VI–VIII). Również niezależnie od znaku anomalii były one największe w środkowej Alasce, a najmniejsze na południu stanu. Wynika to ze zdecydowanie większej zmienności i zróżnicowania temperatury powietrza w miesiącach zimowych i obszarach o klimacie kontynentalnym w porównaniu z temperaturą powietrza w lecie i w obszarach o klimacie



Ryc. 5. Częstość (%) anomalii o różnej wielkości (wartości bezwzględne) podczas miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i anomalnie zimnych (AZM) łącznie na 15 stacjach na Alasce (1951–2015)

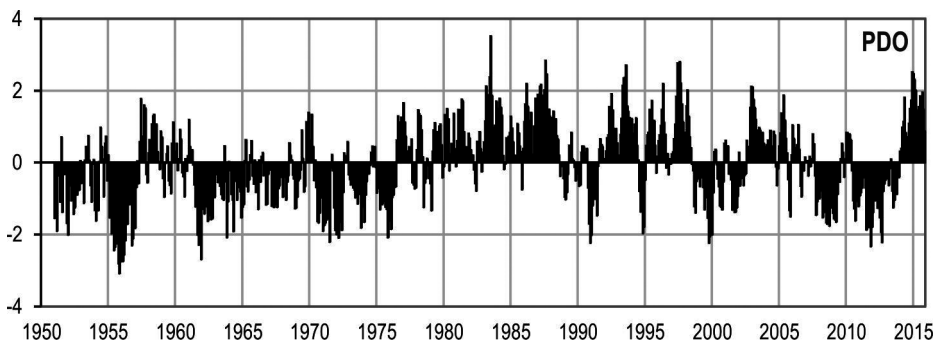
Fig. 5. Frequency (%) of anomalies of a given value (absolute values) during anomalously warm (AWM) and anomalously cold (ACM) months at 15 stations in Alaska (1951–2015)

morskim. Wyniki te potwierdzają badania Papineau (2001), który stwierdził, że odchylenia temperatury powietrza podczas anomalii zimowych są średnio dwa do trzech razy większe w środkowej Alasce niż na wybrzeżu, czego przyczyną jest silne wychładzanie radiacyjne i brak łagodzącego wpływu morza.

## Miesięczne anomalie termiczne na Alasce a Dekadowa Oscylacja Pacyficzna (PDO)

W przebiegu wieloletnim wskaźnika PDO (ryc. 6) jest wyraźnie widoczna prze-waga jego ujemnych wartości do połowy lat 1970., a dodatnich w kolejnych latach (co najmniej do końca lat 1990.), co jest odzwierciedleniem zmiany fazy oscylacji z ujemnej na dodatnią w 1976 r. (Papineau 2001; Hartmann, Wendler 2005b; Wendler, Shulski 2009). Przełom stuleci i drugą połowę pierwszej dekady XXI w. cechowały głównie ujemne wartości tego wskaźnika, co – jak wskazują Wendler i in. (2012) – może oznaczać zmianę fazy oscylacji na ujemną. Wartości wskaźnika w latach 2014 i 2015 były już jednak silnie dodatnie (ryc. 6).

Porównując z sobą wykresy przebiegu wieloletniego PDO (ryc. 6) oraz liczby ACM i AZM (ryc. 4), można zauważyć, że okresom, w których przeważały ujemne wartości wskaźnika, towarzyszyła zwiększona liczba AZM, kiedy natomiast jego wartości były dodatnie, występowało stosunkowo dużo ACM. Szczególnie dobrze jest to widoczne w ostatnich trzech latach badanego wielolecia, które – jak już wspomniano – wyróżniają się dużą liczbą ACM.

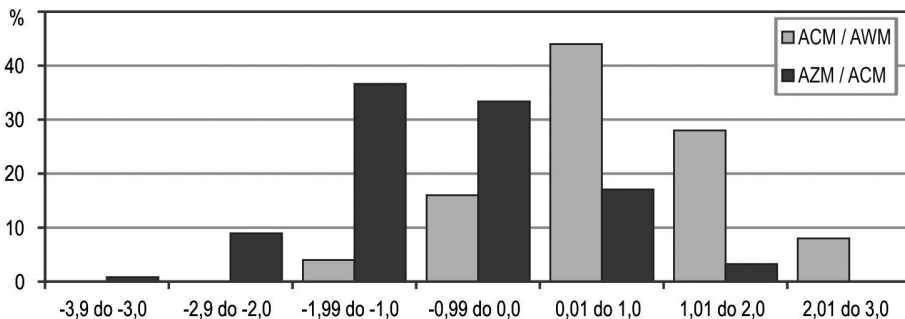


Ryc. 6. Przebieg wieloletni wskaźnika Dekadowej Oscylacji Pacyficznej (PDO) w latach 1951–2015 (wartości miesięczne)

Fig. 6. Multi-annual variability of Pacific Decadal Oscillation (PDO) index in the period 1951–2015 (monthly values)



we wszystkich miesiącach (tab. 4). Miesiące anomalne pod względem termicznym, które wystąpiły podczas fazy PDO odwrotnej do znaku anomalii, zwykle obejmowały tylko jedną stację i często była to Barrow. Takie sytuacje w różnych regionach Alaski świadczą o wystąpieniu innych niż określone przez fazę PDO sprzyjających powstawaniu ACM i AZM uwarunkowań cyrkulacyjnych lub lokalnych. W przypadku ACM mogą to być wiatry fenowe, duże miesięczne sumy usłonecznienia, napływ powietrza



Ryc. 7. Częstość (%) wskaźnika Dekadowej Oscylacji Pacyficznej (PDO) o różnej wielkości podczas miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i anomalnie zimnych (AZM) łącznie na 15 stacjach na Alasce (1951–2015)

Fig. 7. Frequency (%) of Pacific Decadal Oscillation index (PDO) of a given value during anomalously warm (AWM) and anomalously cold (ACM) months at 15 stations in Alaska (1951–2015)

Tab. 4. Miesięczne wartości wskaźnika Dekadowej Oscylacji Pacyficznej (PDO): średnie oraz podczas miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i anomalnie zimnych (AZM) na 15 stacjach na Alasce (1951–2015)

Table 4. Monthly values of the Pacific Decadal Oscillation index (PDO): mean and mean during anomalously warm (AWM) and anomalously cold (ACM) months at 15 stations in Alaska (1951–2015)

PDO	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Sr. Mean	-0,17	-0,09	0,01	0,07	0,03	0,10	-0,03	-0,15	0,17	-0,24	-0,33	-0,27
ACM AWM	0,35	0,36	0,88	1,01	1,24	0,92	0,64	0,45	1,00	0,87	0,18	0,89
AZM ACM	-1,03	-0,74	-1,29	-0,38	-0,68	-0,96	-0,23	-0,86	-0,15	-0,69	-1,70	-1,18

kontynentalnego ze wschodu w ciepłej połowie roku lub morskiego z południa w chłodnej połowie roku, gdy natomiast chodzi o AZM – duże zachmurzenie, chłodne wiatry katabatyczne, a w chłodnej połowie roku znaczne wypromieniowanie ciepła z podłoża oraz występowanie silnych inwersji termicznych (Papineau 2001; Hartmann, Wendler 2005a; Shulski, Wendler 2007; Shulski i in. 2010).

## Przykłady ACM i AZM

Uwarunkowania występowania miesięcy anomalnych pod względem termicznym mogą być rozmaite, i aby je określić, należałoby poświęcić uwagę każdemu ACM i AZM. To umożliwiłoby wyróżnienie pewnych grup uwarunkowań sprzyjających ich występowaniu w poszczególnych regionach Alaski, które mogłoby posłużyć celom prognostycznym. W tym opracowaniu nie przeprowadzono tak szczegółowych badań. W tab. 5 przedstawiono natomiast charakterystykę wybranych ACM i AZM o największym zasięgu przestrzennym i największych anomaliach temperatury powietrza.

Spośród wybranych ACM warto zwrócić uwagę na wspomniany już sierpień 2004 r. Był to ACM obejmujący największą liczbę stacji (tab. 5), a maksymalna temperatura powietrza na niektórych z nich (m.in. Anchorage, Juneau, Fairbanks) przez kilka dni oscylowała wokół 30,0°C. PDO była w fazie dodatniej, jednak wystąpienie wysokiej temperatury było spowodowane głównie przez utrzymujący się nad wschodnią Alaską i północno-zachodnią Kanadą ośrodek wysokiego ciśnienia i wystąpienie sytuacji blokadowej (Athar, Lupo 2010) (ryc. 8). Z sytuacją blokadową był związany również ACM w lutym 1989 r. w Barrow (Tanaka, Milkovich 1990), podczas którego wystąpiła jedna z największych anomalii dodatnich w całym analizowanym materiale (tab. 5). PDO była w fazie ujemnej, a przyczyną anomalii były długo utrzymujący się nad wschodnią Alaską wyż i znajdujący się nad zachodnim Morzem Beringa niż. Dzięki pozycji tych dwóch ośrodków barycznych nad arktyczną część Alaski napływały masy ciepłego powietrza znad Pacyfiku (ryc. 8). Największa dodatnia anomalia temperatury wystąpiła natomiast w Fairbanks podczas ACM w styczniu 1981 r., który objął 8 stacji. PDO była w fazie dodatniej, a Niż Aleucki był głębszy niż zwykle i nieco przesunięty na północ, co umożliwiło adwekcję ciepłego morskiego powietrza z południa i południo-wschodu nad środkową Alaskę (ryc. 8). Jak zauważa Papineau (2001), dużą rolę odegrała także pozycja niżu na wysokości poziomu 500 hPa nad Kameczatką oraz prądu strumieniowego, które spowodowały silny spływ ciepłego powietrza także w wyższych warstwach troposfery.

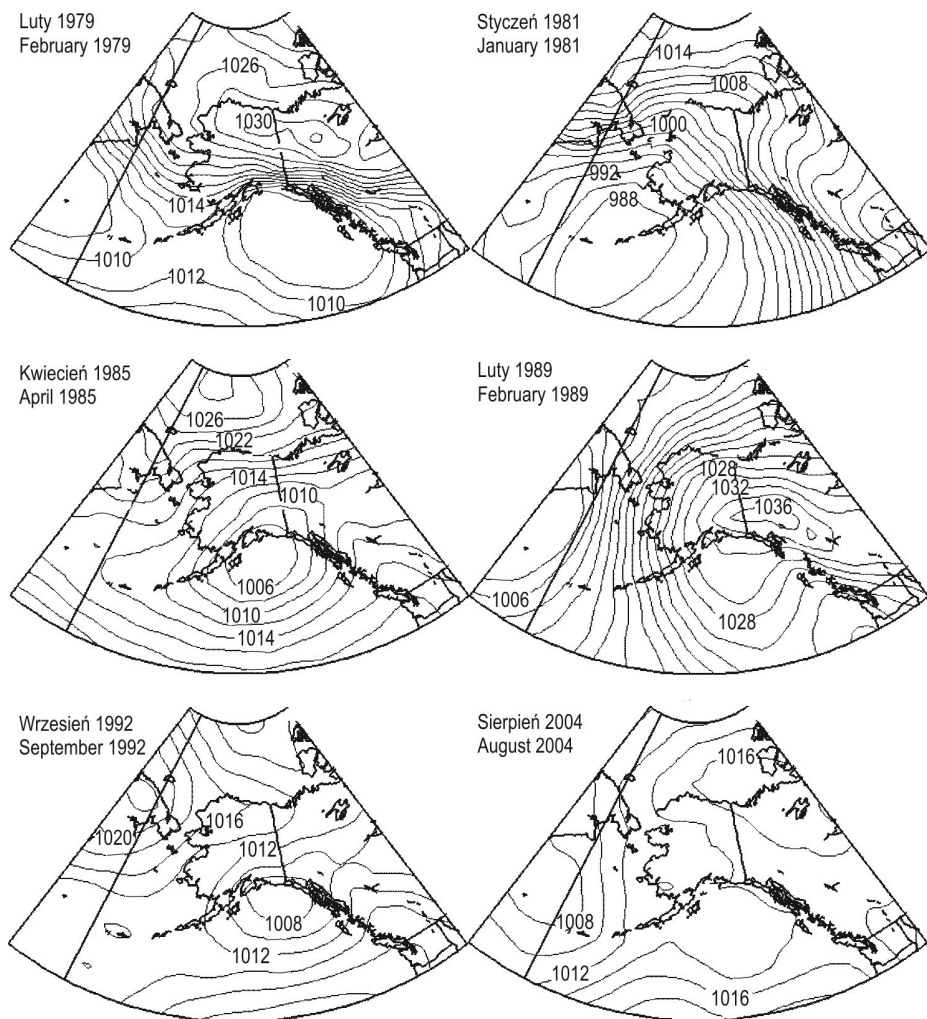
AZM, które miały największy zasięg przestrzenny i objęły 11 stacji, zdarzyły się podczas dodatniej fazy PDO (tab. 5). Przyczyną ich wystąpienia był spływ mroźnego, arktycznego powietrza spowodowany obecnością ośrodka niskiego ciśnienia nad Zatoką Alaski i ośrodka wysokiego ciśnienia zlokalizowanego na północ



Tab. 5. Charakterystyka wybranych miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i zimnych (AZM) o największym zasięgu przestrzennym i największych anomaliach; PDO – wartość średnia miesięczna; LS – liczba stacji; najmniejsza i największa anomalia temperatury powietrza (°C) w danym miesiącu została podana w nawiasach

Table 5. Characteristics of selected anomalously warm (AWM) and cold (ACM) months; PDO – mean monthly value, NS – number of stations; the smallest and the biggest air temperature anomaly values (°C) in particular month are given in brackets

Rok Year	Miesiąc Month	PDO	LS NS	Stacje Stations
ACM / AWM				
1977	VIII	0,64	8	Annette, Bethel, Anchorage (2,0), McGrath, Northway, Big Delta, Nome (3,8), Fairbanks
1981	I	0,59	8	Annette (5,7), Yakutat, Anchorage, Gulkana, McGrath, Big Delta, Fairbanks (15,6), Barrow
1985	I	1,27	8	Kodiak (4,9), King Salmon, Bethel, Anchorage, McGrath, Big Delta (13,0), Nome, Fairbanks
1989	II	-1,02	1	Barrow (14,7)
1995	IX	1,16	8	Annette (2,2), Juneau, King Salmon, Yakutat, Anchorage, Northway, Big Delta (4,9), Fairbanks
2004	VIII	0,85	11	Annette, Juneau, King Salmon, Yakutat (2,2), Bethel (3,5), Anchorage, Gulkana, McGrath, Big Delta, Nome, Fairbanks
2013	VI	-0,78	8	King Salmon, Anchorage (2,5), Gulkana, McGrath, Northway, Big Delta, Fairbanks (3,9), Barrow
2013	X	-0,87	8	Cold Bay (3,2), King Salmon, Bethel, Anchorage, Gulkana, McGrath (7,3), Big Delta, Fairbanks
AZM / ACM				
1964	XII	-1,52	8	Annette (-5,8), Juneau, Yakutat, Anchorage, Northway, Big Delta (-11,6), Fairbanks, Barrow
1971	I	-1,9	4	Kodiak (-5,8), Northway, Big Delta, Fairbanks (-12,4)
1972	IV	-1,65	10	Annette, Kodiak, Juneau (-3,1), King Salmon, Yakutat, Anchorage, Gulkana (-6,5), Northway, Big Delta, Fairbanks
1979	II	-1,33	7	Juneau, Yakutat (-6,7), Gulkana, McGrath, Northway (-17,0), Big Delta, Fairbanks
1984	II	1,21	5	Cold Bay (-5,0), King Salmon, Bethel (-12,3), Nome, Barrow
1985	IV	0,19	11	Cold Bay, Kodiak (-3,3), King Salmon, Bethel, Anchorage, Gulkana, McGrath, Northway, Big Delta, Nome (-9,9), Fairbanks
1992	IX	0,83	11	Kodiak (-2,0), King Salmon, Yakutat, Bethel, Anchorage, Gulkana, McGrath, Northway, Big Delta (-8,2), Nome, Fairbanks
2007	III	-0,36	8	Cold Bay (-5,6), Kodiak, King Salmon, Anchorage, Gulkana, Big Delta (-9,4), Northway, Fairbanks



Ryc. 8. Średnie ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza (hPa) podczas wybranych miesięcy anomalnie ciepłych i anomalnie zimnych; izobary co 2hPa

Fig. 8. Mean sea level pressure (hPa) during selected anomalously warm and cold months; isobars plotted every 2hPa

Źródło: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl> (22.06.2016).

Source: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl> (22.06.2016).

i północo-wchód od Alaski (ryc. 8). Największa ujemna anomalia termiczna wystąpiła podczas AZM w lutym 1979 r. w Northway (tab. 5). Średnia miesięczna temperatura powietrza wyniosła  $-39,0^{\circ}\text{C}$ , a w poszczególnych dniach spadała poniżej  $-55,0^{\circ}\text{C}$ . AZM objęły w sumie siedem stacji i na wszystkich był to najzimniejszy luty w całym okresie badań. Przyczyną tak mroźnej pogody na dużym obszarze (anomalia na pozostałych stacjach w środkowej Alasce wynosiły ok.  $-13,0^{\circ}\text{C}$ ) była trwająca cały miesiąc adwekcja arktycznych mas powietrza przy obecności silnego ośrodka wysokiego ciśnienia sięgającego klinem znad Kanady nad środkową i północną Alaskę (ryc. 8). Tej sytuacji synoptycznej towarzyszyła bezchmurna i bezwietrzna pogoda oraz związane z nią silne wypromieniowanie ciepła z podłoża i inwersje termiczne, sprzyjające długotrwałemu utrzymywaniu się tak niskiej temperatury powietrza (Fischer, Prechtel 1981).

## Podsumowanie i wnioski

W latach 1951–2015 na 15 stacjach na Alasce było 100 miesięcy anomalnie ciepłych (ACM) i 123 miesiące anomalnie zimne (AZM). Ich zasięg obejmował od jednej do 11 stacji, w sumie więc było 243 przypadki ACM i 298 przypadków AZM. Na dużą liczbę ACM wpływ miały przede wszystkim ostatnie lata okresu badań – w latach 1951–2010 różnica między ACM i AZM była znacznie większa w porównaniu z rozpatrywanym 65-leciem (83 ACM i 119 AZM; odpowiednio 190 i 285 przypadków). Wyniki te są zgodne z uzyskanymi przez Papinau (2001), który – badając przebieg dobowej temperatury powietrza w Fairbanks i Yakutat (1954–2000) – stwierdził, że dni anomalnie zimnych było 27% więcej niż anomalnie ciepłych. ACM i AZM najczęściej występowały w miesiącach, w których temperatura powietrza (z wyjątkiem tylko okresu letniego) charakteryzowała się największą zależnością od Dekadowej Oscylacji Pacyficznej (PDO). W większym stopniu PDO wpływało więc na to, kiedy i gdzie występowały anomalie termiczne. Miejsce ich występowania było natomiast w znacznej mierze zależne od uwarunkowań lokalnych poszczególnych stacji. W dużej części miesiące, w których było najwięcej przypadków ACM, to te same, w których było najmniej przypadków AZM, i odwrotnie, co oznacza, że niektóre miesiące są bardziej predestynowane do występowania anomalii o określonym znaku. Może być to spowodowane większym prawdopodobieństwem zaistnienia lokalnych warunków sprzyjających występowaniu ACM lub AZM w poszczególnych miesiącach.

Wyniki badań wskazują na duże znaczenie anomalii temperatury powierzchni wód środkowego i zachodniego Pacyfiku Północnego (wyrażonych wskaźnikiem PDO) na temperaturę powietrza na Alasce. Wpływ PDO na pojawianie się miesięcy anomalnych pod względem termicznym zdaje się większy w przypadku AZM niż ACM – spadek częstości AZM po zmianie fazy PDO z ujemnej na dodatnią w 1976 r. jest większy niż wzrost częstości ACM. Pojawianie się lat z największą liczbą AZM

i ACM oraz występowanie ich ciągów również nawiązują do tych dwóch okresów. Około 80% ACM i AZM wystąpiło odpowiednio podczas dodatniej i ujemnej fazy PDO. Wyniki te potwierdzają Shulski i in. (2010), którzy uznali, że PDO jest bezpośrednią przyczyną powstania dwóch badanych długotrwałych anomalii termicznych (cieplej i zimnej) na Alasce, a dodatkowe znaczenie w tych przypadkach mogła mieć ujemnie skorelowana z temperaturą powietrza Oscylacja Arktyczna (AO). Papineau (2001) twierdzi, że anomalie termiczne na Alasce są pochodną trzech nakładających się na siebie czynników: (1) warunków termicznych północnego Pacyfiku wyrażonych przez wskaźniki ENSO i PDO; (2) kierunków napływu mas powietrza określanymi wskaźnikiem PNA; (3) uwarunkowań lokalnych poszczególnych stacji. Papineau dużą rolę przypisuje PDO, która regulując ciśnienie atmosferyczne nad północnym Pacyfikiem, wpływa na kierunki napływu mas powietrza nad Alaskę. W latach 2000–2010 zaobserwowano duży spadek temperatury powietrza na Alasce (z wyjątkiem regionu arktycznego) (Wendler i in. 2012; Bieniek i in. 2014), co spowodowało nieco częstsze pojawianie się AZM niż w latach wcześniejszych. Cytowani badacze uznali, że przyczyną jest najprawdopodobniej ujemna faza PDO. Badania Wilsona i in. (2007) nad sięgającą 1300 lat, opracowaną metodami dendrochronologicznymi, rekonstrukcją temperatury powietrza w rejonie zatoki Alaska spośród różnych czynników cyrkulacyjnych również wskazują na PDO jako mającą na nią największy wpływ.

Porównując otrzymane wyniki z badaniami przeprowadzonymi w strefie klimatu podbiegunowego obszaru atlantycko-europejskiego w latach 1951–2010 (Twardosz, Kossowska-Cezak 2013b), można stwierdzić pewne cechy wspólne. Liczba przypadków ACM i AZM jest zbliżona w obu obszarach (w Europie 232 ACM i 296 AZM). Miesiące, w których było ich najwięcej, w dużym stopniu pokrywają się z tymi na Alasce, a miesiące z największą liczbą przypadków ACM są tożsame z tymi z najmniejszą liczbą przypadków AZM, i odwrotnie. Również okresy występowania największej liczby przypadków ACM i AZM (uwzględniając okres badań 1951–2010) były podobne – najwięcej ACM wystąpiło w latach 2001–2010, a AZM w latach 1961–1970.

Alaska charakteryzuje się ogromnym zróżnicowaniem klimatycznym oraz złożonością i współoddziaływaniem dużej liczby czynników klimatycznych, dlatego też dalsze badania powinny skupiać się szczególnie na próbach wyjaśniania przyczyn (zarówno cyrkulacyjnych, jak i środowiskowych) powstawania długotrwałych anomalii termicznych w tym obszarze.

## Literatura

- ACIA, 2004, *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment, ACIA Overview report*, Cambridge University Press, Cambridge.
- AMAP, 2011, *Executive Summary: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA), Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*, Oslo, Norway.

- Alexandersson H., 1986, *A homogeneity test applied to precipitation data*, *Journal of Climatology*, 6 (6), 661–675.
- Athar H., Lupo A.R., 2010, *Scale analysis of blocking events from 2002 to 2004: A case study of an unusually persistent blocking event leading to a heat wave in the Gulf of Alaska during August 2004*, *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2010/610263.
- Bennett K.E., Walsh J.E., 2015, *Spatial and temporal changes in indices of extreme precipitation and temperature for Alaska*, *International Journal of Climatology*, 35, 1434–1452.
- Bieniek P.A., Bhatt U.S., Thoman R.L., Angeloff H., Partain J., Papineau J., Fritsch F., Holloway E., Walsh J. E., Daly C., Shulski M., Hufford G., Hill D.F., Calos S., Gens R., 2012, *Climate Divisions for Alaska Based on Objective Methods*, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 1276–1289.
- Bieniek P.A., Walsh J.E., Thoman R.L., Bhatt U.S., 2014, *Using climate divisions to analyze variations and trends in Alaska temperature and precipitation*, *Journal of Climate*, 27 (8), 2800–2818.
- Fischer R., Prechtel A., 1981, *The coldest February*, *National Weather Digest*, 6 (4), 11–13.
- Hartmann B., Wendler G., 2005a, *Climatology of the winter surface temperature inversions in Fairbanks, Alaska*, [w:] *Proceedings of the 85<sup>th</sup> American Meteorological Society Annual Meeting*, 9–13 January 2005, American Meteorological Society, San Diego, USA.
- Hartmann B., Wendler G., 2005b, *The Significance of the 1976 Pacific Climate Shift in the Climatology of Alaska*, *Journal of Climate*, 18 (22), 4824–4839.
- IPCC, 2013, *Climate change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. Midgley M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge–New York.
- Kossowska-Cezak U., Twardosz R., 2012, *Niezwykłe gorące miesiące i sezony letnie w Europie Środkowej i Wschodniej (1951–2010). Cz. I. Niezwykłe gorące miesiące letnie*, *Przegląd Geofizyczny*, 3–4, 299–324.
- Kossowska-Cezak U., Martyn D., Olszewski K., Kopacz-Lembowicz M., 2000, *Meteorologia i klimatologia. Pomiar, obserwacje, opracowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Łódź.
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C., 1997, *A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (6), 1069–1079.
- Maszewski R., 2011, *Współczynniki korelacji między wybranymi wskaźnikami cyrkulacji atmosferycznej a temperaturą powietrza w Arktyce Kanadyjskiej w latach 1951–2010*, *Problemy Klimatologii Polarnej*, 21, 77–90.
- Papineau J.M., 2001, *Wintertime temperature anomalies in Alaska correlated with ENSO and PDO*, *International Journal of Climatology*, 21 (13), 1577–1592.
- Peterson T.C., Heim Jr. R.R., Hirsch R., Kaiser D.P., Brooks H., Diffenbaugh N.S., Dole M.D., Giovannetone J.P., Gurguis K., Karl T.R., Katz R.W., Kunkel K., Enmaier D.L., McCabe G.J., Paciorek C.J., Ryberg K.R., Schubert S., Silva V.B.S., Stewart B.C., Vecchia A.V., Villarini G., Vose R.S., Walsh J., Wehner M., Wolock D., Wolter K., Woodhouse C.A.,

- Wuebbles D. 2013, *Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United States: State of knowledge*, Bulletin of the American Meteorological Society, 94 (6), 821–834.
- Przybylak R., 2007, *Recent air-temperature changes in the Arctic*, Annals of Glaciology, 46 (1), 316–324.
- Shulski M., Walsh J., Stevens E., Thoman R., 2010, *Diagnosis of extended cold-season temperature anomalies in Alaska*, Monthly Weather Review, 138 (2), 453–462.
- Shulski M., Wendler G., 2007, *The Climate of Alaska*, University of Alaska Press, Fairbanks.
- Stafford J.M., Wendler G., Curtis J., 2000, *Temperature and precipitation of Alaska: 50 year trend analysis*, Theoretical and Applied Climatology, 67 (1–2), 33–44.
- Sulikowska A., 2015, *Anomalnie zimne miesiące na Alasce (1951–2010)*, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 139–151.
- Tanaka H.L., Milkovich M.F., 1990, *A heat budget analysis of the polar troposphere in and around Alaska during the abnormal winter of 1988/1989*, Monthly Weather Review, 118 (8), 1628–1639.
- Twardosz R., Kossowska-Cezak U., 2013a, *Exceptionally hot summers in Central and Eastern Europe (1951–2010)*, Theoretical and Applied Climatology, 112 (3–4), 617–628.
- Twardosz R., Kossowska-Cezak U., 2013b, *Niezwykłe anomalie termiczne w strefie klimatu podbiegunowego obszaru atlantycko-europejskiego*, Problemy Klimatologii Polarnej, 23, 93–105.
- Von Storch H., Zwiers R.W., 2002, *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Walsh J.E., Overland J.E., Groisman P.Y., Rudolf B., 2011, *Ongoing Climate Change in the Arctic*, Ambio, 40 (1), 6–16.
- Warakomski W., 1989/1990, *W poszukiwaniu koncepcji anomalii klimatycznych*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, sec. B, 44/45, 211–224.
- Wendler G., Chen L., Moore B., 2012, *The First Decade of the New Century: A Cooling Trend for Most of Alaska*, Open Atmospheric Science Journal, 6, 111–116.
- Wendler G., Shulski M., 2009, *A century of climate change for Fairbanks, Alaska*, Arctic, 62 (3), 295–300.
- Wendler G., Galloway K., Stuefer M., 2016, *On the climate and climate change of Sitka, Southeast Alaska*, Theoretical and Applied Climatology, 126, 27–34.
- Wilson R., Wiles G., D'Arrigo R., Zweck C., 2007, *Cycles and shifts: 1,300 years of multi-decadal temperature variability in the Gulf of Alaska*, Climate Dynamics, 28 (4), 425–440.
- Zblewski S., Marsz A., 2010, *Zmiany niektórych cech klimatu w Arktyce Kanadyjskiej w ostatnim ćwierćwieczu XX i na początku XXI wieku*, Problemy Klimatologii Polarnej, 20, 45–62.

Agnieszka Sulikowska  
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie  
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej  
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków  
a.sulikowska@uj.edu.pl