

JAN TAMULEWICZ

GRAFOWA METODA BADANIA STRUKTURY PÓL METEOROLOGICZNYCH – NA PRZYKŁADZIE ZACHODNIEJ CZĘŚCI POLA OPADÓW POLSKI

ZARYS TREŚCI

Wykorzystując elementy teorii grafów dokonano rozpoznania strukturalnych właściwości pola opadów w przekroju wieloletnim (1951 – 1980). Identyfikacja relacji pluwiometrycznego podobieństwa ujęta metodą grafową pozwoliła na uzyskanie formalnej struktury pola opadów oraz umożliwiła delimitację obszaru badań na powierzchni pluwiometrycznej ciągłości i nieciągłości.

WPROWADZENIE

W ostatnim okresie coraz powszechniej obserwuje się próby parametryzacji różnych strumieni wymiany energii i wody, aproksymujących złożone niekiedy procesy fizyczne zachodzące w atmosferze. Niektóre z tych strumieni są bardziej widoczne i na ogół lepiej poznane, inne zaś ukryte i prawie nie znane. Wszystkie należy starać się rozpoznać, pełnią one bowiem różnorakie funkcje w systemie klimatycznym i w gruncie rzeczy stanowią o jego wewnętrznej złożoności. O stosunkach klimatycznych można rozważać również w kategoriach funkcji wymuszających i reagujących (Lettau, 1969). Charakter funkcji wymuszającej mają między innymi opady atmosferyczne. Stanowiąc ważne ogniwo w systemie obiegu wilgoci opady uznawane są za jeden z istotniejszych elementów na wyjściu w modelach klimatu (por. Lockwood, 1979; Kirkby, 1990). Polimorfizm czasowo-przestrzennych serii pluwiometrycznych koduje ukrytą często strukturę pola meteorologicznego, stawiając przed analizą geograficzną rozmaite problemy.

W literaturze klimatologicznej charakterystyce opadów atmosferycznych poświęca się sporo uwagi. Opady uznawane są obok temperatury powietrza za ten element, który w najbardziej spektakularnym stopniu decyduje o typie pogody i znacząco wpływa na cechy klimatu. Zrozumiałym skutkiem powszechnego zainteresowania opadami jest duża różnorodność sposobów analizy oraz interpretacji wyników uzyskanych różnymi procedurami analitycznymi. Wszystkie one w określony sposób weryfikują i wzbogacają istniejącą informację o przestrzenno-czasowym funkcjonowaniu cech reżimu opadów.

W zasadzie brak jest obszerniejszych prac poświęconych przestrzennym relacjom strukturalnym występującym w polu opadów, a zwłaszcza jeśli przyjąć, że ową strukturę tworzą i wyrażają relacje pluwiometrycznego podobieństwa. Tym bardziej z uwagą należy odnotować dotychczasowe próby poszukiwania czasoprzestrzennych związków w zakresie czy to rocznych sum opadów w przekroju wieloletnim (Kozuchowski, 1985), czy też innych wskaźników dotyczących rocznego przebiegu tego elementu (Ewert, 1984; Kozuchowski, Wibig, 1988).

Niniejsze opracowanie dotyczy także relacji podobieństwa stosunków opadowych i również rozpatruje je w okresie wieloletnim. Sposób rozpoznawania oraz charakterystyki relacji występujących w polu opadów jest wyraźnie odmienny od prób poczynionych przez wspomnianych wyżej autorów. Obecnie zastosowane podejście ma charakter analizy strukturalnej, zaś adaptacja i wykorzystanie do tego metody grafowej jest pewną propozycją metodologiczną. Rekonstrukcja organizacji struktury pola opadów w przekroju wieloletnim stwarza – zdaniem autora – wiarygodne przesłanki dla identyfikacji cech stosunków pluwiometrycznych w ujęciu diachronicznym, polegającym na połączeniu analizy struktury z jej zmiennością w czasie.

Analizie poddano stosunki opadowe panujące w zachodniej części obszaru Polski w okresie 1951 – 1980. Na podstawie wielkości miesięcznych sum opadów, odnotowanych w tym okresie w 36 stacjach meteorologicznych rozmieszczonych na obszarze badań (por. rys. 1), podjęto próbę scharakteryzowania oraz wymiernego oszacowania przestrzennych relacji istotnego podobieństwa pluwiometrycznego w polu meteorologicznym. Statystycznej weryfikacji poddano hipotezę zakładającą brak w polu opadów, między sąsiednimi punktami (stacjami), istotnej różnicy w zakresie przebiegu wielkości sum miesięcznych. Postawiona w taki sposób hipoteza wynika z zakładanej *ex definitione* ciągłości pól meteorologicznych.

Użytecznym wskaźnikiem stopnia wzajemnego podobieństwa przebiegów wielkości miesięcznych sum opadów może być wartość statystyki t w teście dla dwóch średnich. Statystyka t uwzględnia wartości sum miesięcznych i respektuje ich chronologię w okresie roku. Analizuje zatem cechę, która w pewnym sensie aproksymuje roczną sumę opadów.

Test dla dwóch średnich należy do grupy parametrycznych testów istotności, pozwalających na odrzucenie sprawdzanej hipotezy zerowej H_0 przy założonym poziomie istotności. Szczególny charakter porównywanych zbiorów – sumy opadów kolejnych miesięcy tworzące pary przyporządkowanych sobie liczb – nakazuje traktować oba zbiory jako wyniki pomiarów jednej populacji i rozpatrywać różnice: $d = x - y$ (por. Bielecki, Jurkiewicz, Szymanowska, 1975; Greń, 1982).

Test dla średniej różnicy polega na obliczeniu statystyki t według wzoru:

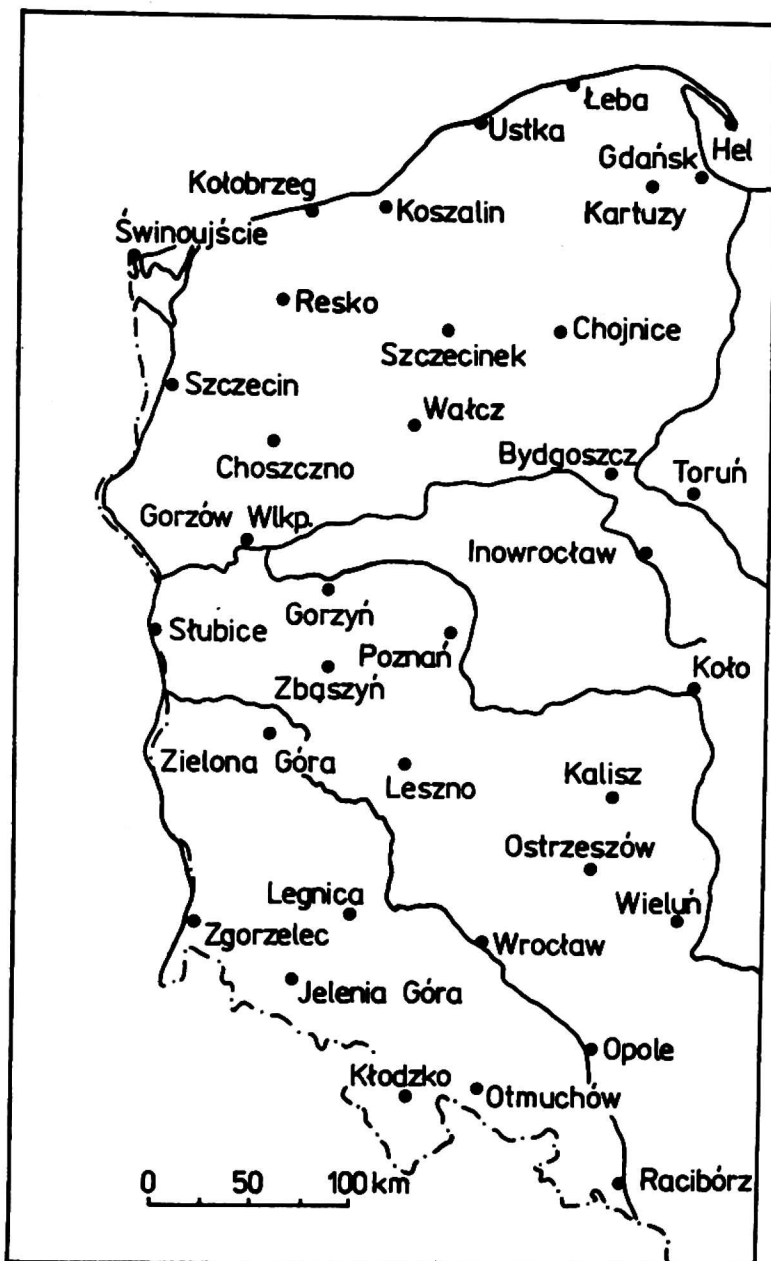
$$t = \frac{\bar{d}}{S_d} \sqrt{n - 1}$$

gdzie: \bar{d} jest średnią różnicą z populacji różnic $d=x-y$,

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}}$$

oznacza odchylenie standardowe różnic d , zaś n jest liczbą porównywanych par. Następnie poddaje się weryfikacji hipotezę $H_0: \bar{d} = 0$, zakładającą brak istotnej różnicy pomiędzy porównywanymi zbiorami. Z tablicy rozkładu t Studenta dla założonego poziomu istotności α należy odczytać wartość krytyczną t_α . Jeśli wyliczona wartość $t \geq t_\alpha$, wówczas hipotezę H_0 należy odrzucić. Gdy $t < t_\alpha$, wówczas nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 .

Dla porównywanych ciągów wartości sum opadów od stycznia do grudnia, dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ odczytana wartość statystyki $t_\alpha = 2,201$. Obliczone wartości statystyki $t \geq 2,201$ powodują odrzucenie hipotezy $H_0: \bar{d} = 0$ i tym samym wskazują, że porównywane szeregi sum miesięcznych nie są do siebie podobne.



Rys. 1. Rozmieszczenie stacji meteorologicznych
Fig. 1. The distribution of meteorological stations

ELEMENTY STRUKTURY POLA OPADÓW - WYBRANE POJĘCIA I ICH DEFINICJE

Znaczenie określenia „struktura pola opadów” w rozumieniu stosowanym w niniejszym opracowaniu da się pełniej objaśnić po uprzednim przedstawieniu wybranych informacji z zakresu teorii pola oraz struktury. W głównym nurcie przeprowadzonych badań mieści się sekwencja powiązanych ze sobą pojęć dotyczących kolejno: struktury pola meteorologicznego – ciągłości pola opadów – struktury pola opadów.

Struktura pola meteorologicznego. Dowolne pole meteorologiczne można traktować jako pewien obiekt fizyczny lub jako pewien obiekt matematyczny.

W pierwszym przypadku pole interpretujemy jako formę istnienia materii, zaś reprezentantem obiektu fizycznego jest tu punkt materialny; w polu występuje nieskończona liczba punktów. W praktyce meteorologicznej jedynie w niektórych punktach prowadzi się pomiary meteorologiczne. Natomiast pole jako obiekt matematyczny jest pewną idealizacją rzeczywistości i służy do wygodnego zapisu wyników obserwacji dokonanych w czasoprzestrzeni. Takie traktowanie pola pozwala na statystyczno-matematyczny opis stosunków klimatycznych poprzez parametryzację lub modelowanie pól meteorologicznych.

Szczególnie istotną właściwością pola meteorologicznego jest jego jednorodność oraz izotropowość. Respektując obie te własności zakłada się, że wartość średnia oraz wariancja charakterystyki f w każdym punkcie pola są jednakowe, zaś wartość funkcji strukturalnej i korelacyjnej zależy od odległości między punktami pomiarowymi (por. Pruchnicki, 1987; Sawicki, 1988).

Sama struktura pola oznacza zazwyczaj układ (porządek) przestrzenny elementów, które ten układ stanowią i jednocześnie objaśniają. Często struktura traktowana jest jako korelat pojęcia całość i stąd strukturą nazywa się zarówno wzajemne relacje elementów tworzących całość, jak i określoną całość zbudowaną w pewien sposób z określonych elementów.

Statystyczną strukturą pól meteorologicznych są według Pruchnickiego (1987) „... prawidłowości, którym podlegają uśrednione w czasie zbiory elementów meteorologicznych”. Matematyczna interpretacja struktury pól meteorologicznych staje się możliwa po rozpoznaniu funkcji strukturalnych i korelacyjnych (por. Czelnai, 1966; Czelnai, Desi, Rakoczi, Szakacs, 1967; Sharon, 1974).

Ciągłość pola opadów. Przestrzeń, jaką zajmuje się geografia, a ściślej zjawiska i procesy w niej zachodzące, są postrzegane jako kategorie ciągłe, co pozwala między innymi na izarytmiczne przedstawianie ich przestrzennej zmienności.

Większość opracowań klimatologicznych zajmuje się relacjami zarówno w aspekcie chronologicznym, jak również chorologicznym. Spośród relacji występujących w obrębie pól meteorologicznych klimatologia preferuje relacje podobieństwa. W szczególnych przypadkach (czas, przestrzeń) podobieństwo oznacza pewne kontinuum i jest w ten sposób atrybutem ciągłości. O ciągłości możemy zatem mówić wówczas, gdy między sąsiednimi punktami pola zachodzą relacje pozytywne, świadczące o istotnym podobieństwie na przykład opadów atmosferycznych. Istnieje tu, jak się wydaje, pewna analogia do zjawiska autokorelacji przestrzennej w zbiorach obserwacji geograficznych. Według Cliffa i Orda (1973) jest ona rozumiana następująco: jeśli występowanie pewnego zjawiska w jednej jednostce przestrzennej powoduje zwiększenie lub zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania tego zjawiska w sąsiednich jednostkach, to zjawisko to wykazuje autokorelację przestrzenną.

Klimatologiczna natura rozpoznawania pól meteorologicznych uwzględnia element czasu badając okresy wieloletnie. W związku z tym wylania się pytanie o to czy ciągłość pola opadów stwierdzona w pojedynczym roku jest tożsama z ciągłością odnotowywaną zawsze, bądź też w przeważającej liczbie lat okresu wieloletniego. Dla wyrażenia odmienności semantycznej można by mówić w pierwszym przypadku o ciągłości pola opadów, w drugim zaś – z uwagi na dominu-

jącą powtarzalność – o opadowej (pluwiometrycznej) ciągłości pola. Oznacza to, że ciągłość pola opadów zachodzi bądź nie (w danym roku), natomiast w pluwiometrycznie ciągłym polu relacje istotnego podobieństwa zachodzą z ponad 50% prawdopodobieństwem. Innymi słowy, opadowa ciągłość pola może zaistnieć z prawdopodobieństwem zawartym między wartościami 50% – w fazie pojawiania się ciągłości, a 100% – w przypadku ciągłości zupełnej.

Struktura pola opadów. Nieliczne opracowania poświęcone analizie strukturalnej pola opadów rozpatrują i wykorzystują przede wszystkim właściwości funkcji strukturalnych (np. Mooley, Mahomet Ismail, 1982), chociaż w niektórych pracach dodatkowo wykorzystano funkcje korelacyjne lub autokorelacyjne (np. Czelnai, Desi, Rakoczi, Szakacs, 1967; Kutiel, 1982).

Używane w niniejszym opracowaniu określenie „struktura pola opadów” wyraża nieco odmienny sens. Zasadniczo jego znaczenie mieści się w obrębie dyskutowanych tu ustaleń terminologicznych. W klimatologii rok jest obok doby traktowany jako okres naturalnej (astronomicznie) zmienności stosunków pogodowych. Roczny rytm zmienności pogody bywa niekiedy bardzo zróżnicowany z roku na rok. Dlatego między innymi w opracowaniach poświęconych zwłaszcza temperaturze powietrza oraz opadom ważne miejsce zajmuje prezentacja miar i wskaźników w przebiegu wieloletnim (por. np. Kaczorowska, 1962; Brazdil, 1986; Trepieńska, 1988). Wyraźną sezonowość w ciągu roku i zmienność w wieloleciu wykazuje również kompleks sytuacji synoptycznych (Lityński, 1969) oraz wpływ nad obszar Polski mas powietrznych (Warakomski, 1969).

Nałożenie wspomnianych elementów i procesów pogodowych na względnie statyczną ośnowę geograficznych czynników klimatu w skali mezoregionalnej (rzeźba, pokrycie terenu, itp.) powoduje, że w ciągłym *ex definitione* polu meteorologicznym, między jego punktami, obserwuje się w ciągu wielolecia relacje podobieństwa bądź niepodobieństwa o różnym stopniu trwałości. Można wyobrazić sobie sytuację, gdy w konkretnym roku obok zwartych obszarów ciągłości reżimu opadów występują obszary jej pozbawione. W innych latach dany wariant przestrzennej organizacji obszarów ciągłości i nieciągłości opadów może być zastąpiony odmiennym, ale równie dobrze może się powtórzyć. Tak czy inaczej, wzajemne usytuowanie obu kategorii powierzchni może być uznane za pewną formę struktury przestrzennej pola opadów. Postulat probabilistycznego ujęcia struktury wymaga oszacowania prawdopodobieństwa wystąpienia w polu meteorologicznym relacji istotnego podobieństwa. W zależności od tego czy owe prawdopodobieństwo jest większe od 50%, czy też nie (kryterium przewagi), można w miarę jednoznacznie wydzielić w polu opadów obszary pluwiometrycznej ciągłości oraz nieciągłości.

W rezultacie przedstawionych tu uwag można przyjąć, iż strukturę pola opadów wyraża przestrzenny układ pozytywnych i negatywnych relacji pluwiometrycznego podobieństwa zachodzących między sąsiednimi punktami pola. W ujęciu probabilistycznym narzuca i wyznacza ją przestrzenna organizacja obszarów pluwiometrycznej ciągłości i nieciągłości.

ADAPTACJA ELEMENTÓW TEORII GRAFÓW DO BADANIA STRUKTURY POLA OPADÓW

W procesie badania zbiorowości empirycznych rozpatrujemy niekiedy ich strukturę ze względu na określoną relację, a w postępowaniu analitycznym – z czego nie zawsze zdajemy sobie sprawę – mamy do czynienia z elementami teorii grafów. W hierarchii pomiaru strukturalnego właśnie odpowiednio skonstruowany graf może być odzwierciedleniem struktury (por. Abell, 1971).

Teoria grafów jest działem typologii algebraicznej związanej z systemami algebraicznymi, obejmującej działania na zbiorach oraz strukturach (Pulczyn, 1968). Grafy i różnego rodzaju sieci grafowe stanowią wygodny aparat formalny do modelowania systemowego różnorodnych obiektów (Korzan, 1968), zaś zdaniem Rapoporta (1973) teoria grafów jest teorią struktury.

Zarys ogólnych podstaw teorii grafów przedstawiają między innymi: Ford Jr., Fulkerson (1962), Pulczyn (1968), Deo (1974), Korzan (1978), Kulikowski (1986). Poniżej zdefiniowano jedynie te pojęcia, które w niniejszym opracowaniu zostały wykorzystane do analizy pola opadów.

Graf $G = (V, E)$ składa się ze zbioru obiektów $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ zwanych *wierzchołkami* oraz zbioru $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, którego elementy nazywa się *krawędziami*. W interpretacji geometrycznej grafu elementy V przedstawia się jako punkty na płaszczyźnie – wierzchołki, elementy E zaś jako odcinki łączące dowolne pary punktów. Linie nie posiadające skierowania (zwrotu) są właśnie krawędziami.

Graf płaski to taki, którego krawędzie nie mają punktów wspólnych oprócz wierzchołków. *Stopniem* danego wierzchołka grafu jest liczba krawędzi dochodzących do niego.

Graf nazywa się *spójny*, jeśli każde jego dwa wierzchołki połączone są łańcuchem, to jest ciągiem krawędzi, w którym koniec poprzedniej krawędzi jest początkiem następczej.

Dwa grafy nazywa się *izomorficznymi* (równoważnymi), jeśli zachodzi wzajemna jednoznaczna, odpowiedniość między ich wierzchołkami oraz między ich krawędziami przy zachowaniu relacji incydencji. Oznacza to, że grafy izomorficzne muszą mieć: tę samą liczbę wierzchołków, tę samą liczbę krawędzi, równą liczbę wierzchołków o danym stopniu.

Powyższe pojęcia stanowią dobry punkt wyjścia do konstruowania wielu miar topologicznych, które mierzą różne aspekty struktury grafów. Najczęściej stosowane miary biorą pod uwagę dane o liczbie wierzchołków (v) oraz krawędzi (e) i charakteryzują spójność sieci (por. Zagożdżon, 1977; Taylor, 1980).

Tworząc grafową sieć badania struktury pola opadów założono, że:

- a) sąsiednie stacje zostaną połączone krawędziami w taki sposób, aby badany obszar został pokryty polami podstawowymi w kształcie trójkąta,
- b) poszczególne wieloboki utworzone zostaną z możliwie najkrótszych krawędzi, zaś kąty wewnętrzne wieloboków nie mogą być mniejsze od 30° ,
- c) utworzona sieć będzie grafem płaskim, to znaczy takim, w którym żadne z jego krawędzi nie przetną się.

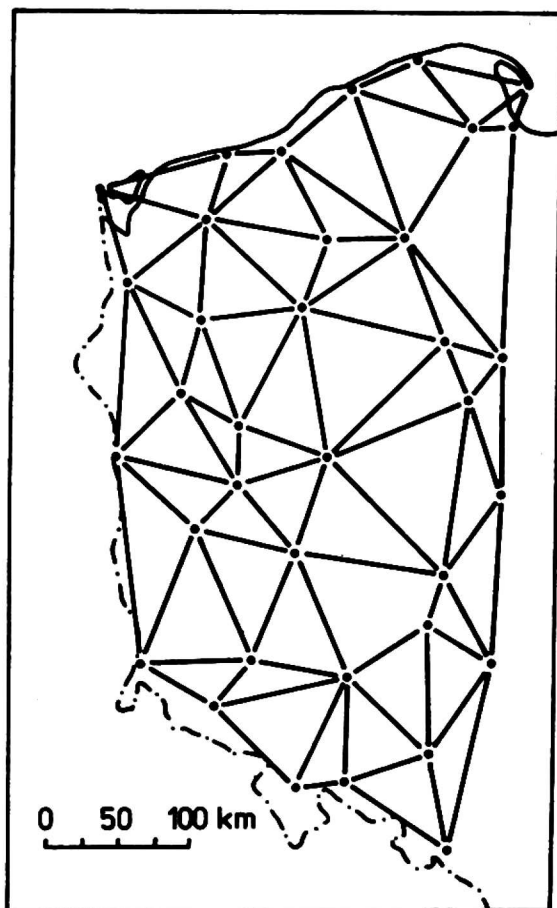
Geograficzny graf badania struktury pola opadów zachodniej części Polski, utworzony zgodnie z przyjętymi zasadami, przedstawiono na rysunku 2. Wszystkie jednostki przestrzenne sieci, poza dwoma przypadkami, spełniają wymóg trójkątnego kształtu, a geograficzna orientacja tworzących je krawędzi, jak również wielkość, zostały zdeterminowane lokalizacją wierzchołków (stacji) w przestrzeni geograficznej. Wspomniane dwa pola podstawowe są czworobokami z wierzchołkami tak usytuowanymi wzajemnie, że poprowadzenie w ich obrębie dodatkowej krawędzi nie jest możliwe bez naruszenia kryterium kąтового.

Powstały graf ma 36 wierzchołków, między którymi różpięto 86 krawędzi. Jest on grafem płaskim, nieskierowanym oraz spójnym. Należy zaznaczyć, że w świetle teorii grafów utworzona grafowa sieć badania struktury, z uwagi na uwzględnienie jedynie wybranych połączeń spośród możliwych dla danego zbioru wierzchołków, jest faktycznie tzw. grafem częściowym. Krawędzie utworzonego grafu stykające się w wierzchołkach tworzą 51 pól podstawowych.

Wspomniano wcześniej, że w analizie strukturalnej pola opadów uwzględniona zostanie jedna z istotniejszych cech reżimu opadów, a mianowicie roczny przebieg wielkości sum miesięcznych. Elementami struktury pola opadów będą relacje podobieństwa w zakresie wspomnianej cechy testowane za pomocą statystyki t w teście różnicy dla dwóch średnich. Przeprowadzone testowanie będzie zmierzało do wyjaśnienia czy zestawione kontrasty (pary stacji meteorologicznych) różnią się między sobą w statystycznie istotnym wymiarze, czy też nie. Zestawiając porównywane pary „sąsiadujących ze sobą” stacji uzyskano profil przestrzenny obejmujący łącznie 86 kontrastów połączonych krawędziami sieci grafowej. Rozpatrując oddzielnie kontrasty w poszczególnych latach uzyskano czasowe profile analizy.

Uznano, że ujęcie grafowe wyników testowania pozwoli z jednej strony na wizualną ocenę przestrzennego zróżnicowania w polu opadów relacji podobieństwa w poszczególnych latach, z drugiej zaś miary wynikające z topologicznych własności sieci grafowych umożliwią porównanie złożoności struktur w badanym okresie.

W grafowym opisie strukturalnych właściwości pola przebiegu wielkości sum miesięcznych uwzględniono dwa wskaźniki charakteryzujące stopień spójności sieci grafowych. Wskaźnik γ (Kansky' ego (1963) jest miarą stopnia



Rys. 2. Geograficzny graf badania struktury pola opadów

Fig. 2. A geographical graph for the study of the structure of a precipitation field

time profiles of analysis

rozwinęcia sieci ze względu na jej krawędzie. Dla grafów płaskich: $\gamma = \frac{e}{e_{\max}}$ i przyjmuje wartości w przedziale 0–1. Stopień względny rozwinęcia grafu (G) Zagożdżona (1977) o postaci formalnej $G = \frac{e_{\max} - e}{v}$ podaje liczbę krawędzi brakujących do grafu pełnego, przypadających na jeden wierzchołek. Wartości wskaźnika G rosną od zera w miarę spadku spójności grafu.

ZARYS STRUKTURY POLA OPADÓW W UJĘCIU DIACHRONICZNYM

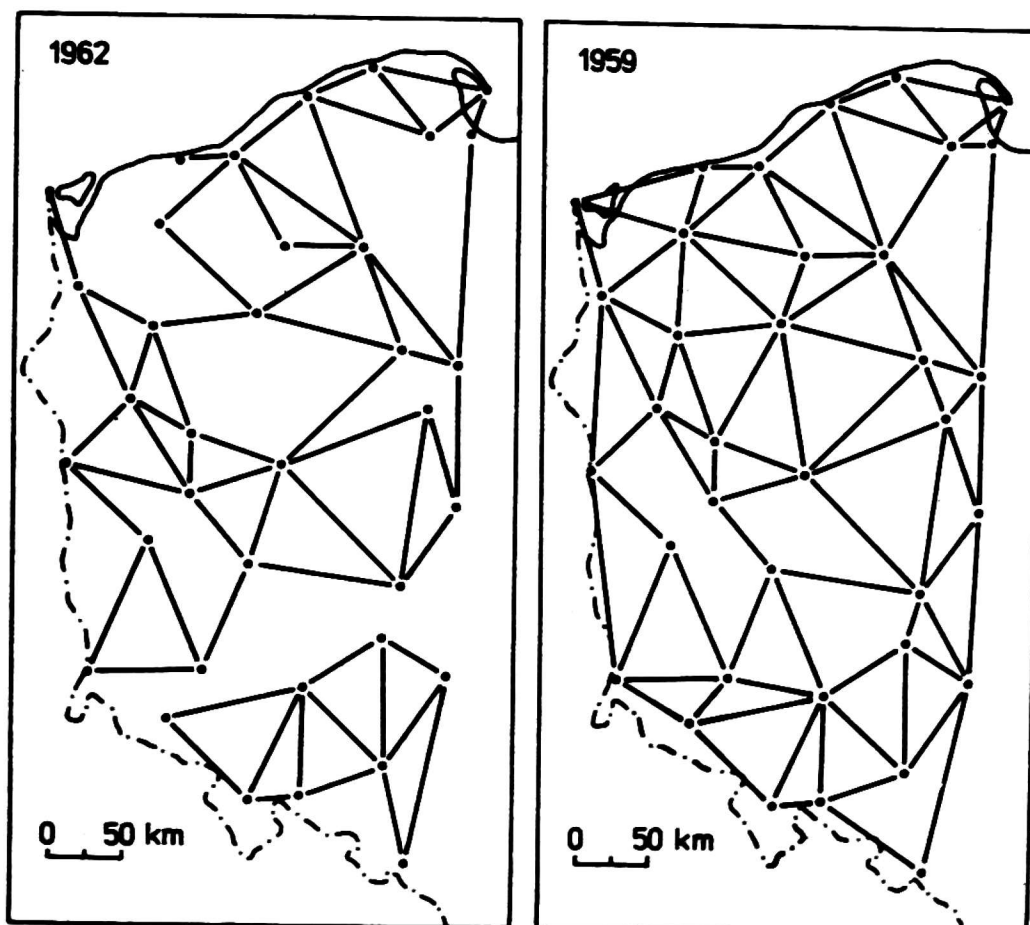
Rozpoznania struktury pola opadów dokonano w dwóch wariantach. W pierwszej kolejności rozpatrzono relacje istotnego podobieństwa przebiegu wielkości sum miesięcznych zachodzących w kolejnych latach badanego okresu między węzłami utworzonej sieci. W drugim wariantcie dokonano oceny „zachowania się” poszczególnych kontrastów w przekroju wieloletnim. W tym przypadku określano prawdopodobieństwo, z jakim zachodzą relacje istotnego podobieństwa wzdłuż każdej krawędzi sieci grafowej. Podobną probabilistyczną analizę przeprowadzono badając częstość pojawiania się przestrzennego podobieństwa (przestrzennej jednolitości) we wszystkich polach podstawowych utworzonej sieci.

RELACJE PODOBIEŃSTWA W PRZEKROJU WIELOLETNIM

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują, że w kolejnych latach grafową sieć podobieństwa tworzyły krawędzie podobieństwa w liczbie od 61 w roku 1962 do 80 w roku 1959, co oznacza, że zawsze relacje istotnego podobieństwa przebiegu sum miesięcznych dominują w polu opadów. W roku z najmniejszą liczbą krawędzi podobieństwa (1962) spójność otrzymanej sieci charakteryzują wskaźniki spójności: $\gamma = 0,71$ oraz $G = 0,69$. W tym roku krawędzie podobieństwa występują licznie przede wszystkim w środkowej oraz wschodniej części obszaru badań; ich brak stwierdza się głównie wzdłuż zachodniej granicy Polski (por. rys. 3). Najbardziej spójną sieć podobieństwa w roku 1959 tworzy 80 krawędzi ($\gamma = 0,92$, $G = 0,17$), a powstała sieć pokrywa niemal cały badany obszar. Podobieństwa nie odnotowano w tym roku jedynie wzdłuż ciągu krawędzi: Słubice – Zbąszyń – Zielona Góra – Leszno – Poznań oraz wzdłuż krawędzi Opole – Racibórz (por. rys. 3).

Wartości wyliczonych wskaźników spójności sieci podobieństwa w kolejnych latach okresu 1951 – 1980 zostały zawarte w tabeli 1. Ich przegląd wskazuje na dużą na ogół spójność kolejnych grafów i na w miarę wyrównany przebieg liczbowych ekwiwalentów tej spójności.

W następnym kroku podjęto ocenę jednolitości w obrębie pól podstawowych sieci. Jeżeli w danym roku wzdłuż wszystkich krawędzi wyznaczających dane pole podstawowe (wielobok) zachodzi pozytywna relacja oznaczająca istotne podobieństwo, wówczas całą powierzchnię tej jednostki można traktować jako obszar jednolity, w obrębie którego (między jego węzłami) zachodzą tylko



Rys. 3. Krawędzie grafu podobieństwa. Przykład struktury najmniej (1962) oraz najbardziej (1959) spójnej

Fig. 3. The edges of a similarity graph. An example of a structure of least connectivity (1962) and

Tabela 1 – Table 1

Spójność grafów podobieństwa przebiegu wielkości sum miesięcznych w latach 1951 – 1980

The connectivity of the similarity graphs of patterns of monthly rainfalls in the years 1951 – 1980

Rok Year	Wskaźniki spójności Connectivity indices	
	γ	G
1966	0,86	0,33
52	0,85	0,36
53	0,82	0,42
54	0,86	0,33
55	0,89	0,25
56	0,81	0,44
57	0,78	0,52
58	0,78	0,52
59	0,92	0,17
1960	0,91	0,19
61	0,88	0,28
62	0,71	0,69
63	0,82	0,42
64	0,86	0,33
1965	0,84	0,39

Rok Year	Wskaźniki spójności Connectivity indices	
	γ	G
1966	0,86	0,33
67	0,91	0,19
68	0,90	0,22
69	0,88	0,28
1970	0,89	0,25
71	0,79	0,50
72	0,81	0,44
73	0,79	0,50
74	0,77	0,55
75	0,87	0,30
76	0,88	0,28
77	0,79	0,50
78	0,80	0,47
79	0,79	0,50
1980	0,82	0,42

i wyłącznie relacje istotnego podobieństwa. Wydaje się, że poszerzenie prowadzonej dotąd analizy o elementy oceny pluwiometrycznej jednorodności pola, które funkcjonują w wymiarze przestrzeni metrycznej, pozwoli na wyodrębnienie mniej lub bardziej zwartych obszarów z określonym stopniem wewnętrznej integracji i dzięki temu o różnych (nowych) właściwościach strukturalnych.

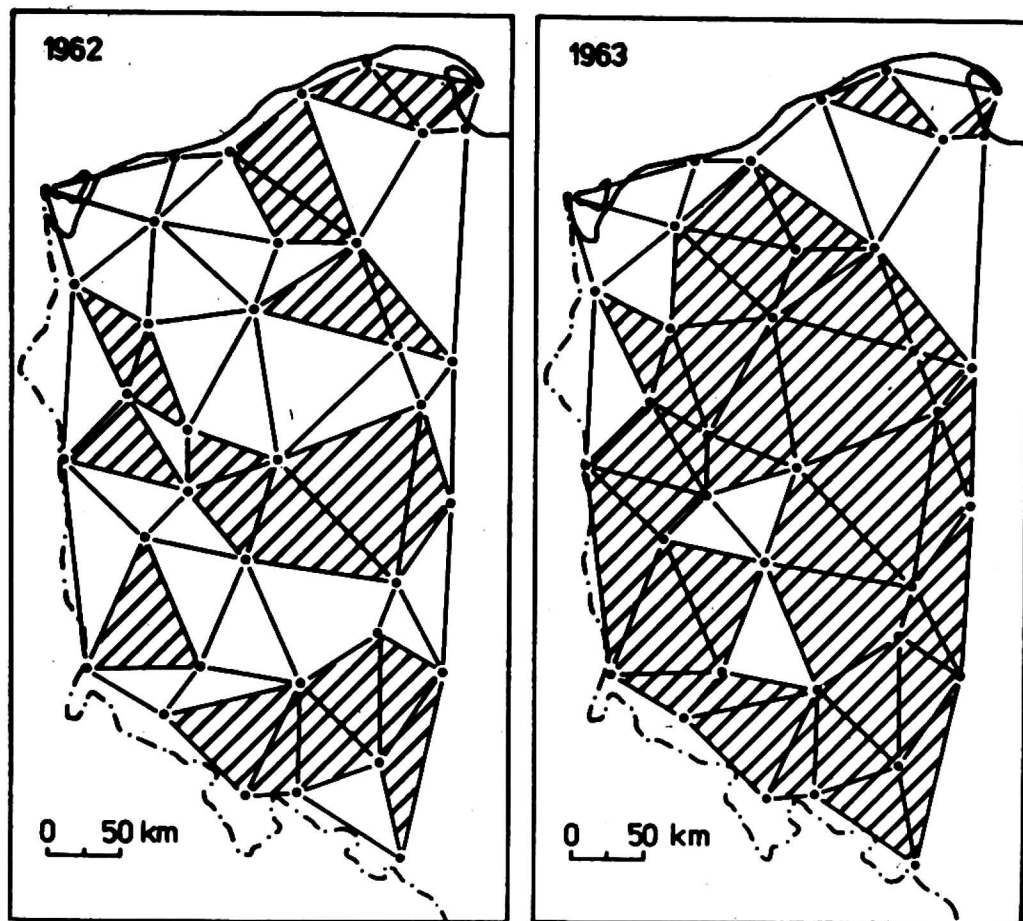
W przekroju wieloletnim udział powierzchni pól podstawowych, w których stwierdzono istotne podobieństwo przebiegu wielkości sum miesięcznych zmieniał się od 41,3% ogólnej powierzchni sieci w roku 1962 do 79,1% w roku 1963. W pierwszym przypadku wieloboki podobieństwa utworzyły trzy zwarte powierzchnie, z których północna obejmuje pogranicze Pobrzeża Gdańskiego oraz Pobrzeża Koszalińskiego i następnie przez Pojezierze Bytowskie i Pojezierze Krajeńskie dochodzi do Kotliny Toruńskiej, środkowa ciągnie się strefą od Pojezierza Myśliborskiego poprzez Kotlinę Gorzowską i Pojezierze Poznańskie do Pojezierza Gnieźnieńskiego, a powierzchnia południowa obejmuje znaczną część Pogórza Zachodniosudeckiego i Równiny Opolskiej (por. rys. 4).

W roku 1963 na tle ogólnie zwartej powierzchni podobieństwa zaznaczyły się jedynie nieliczne wieloboki pozbawione relacji istotnego podobieństwa. Te ostatnie obejmują wąską strefą Pobrzeże Szczecińskie, Pobrzeże Koszalińskie oraz fragment wschodniej części Pojezierza Pomorskiego (por. rys. 4).

UJĘCIE PROBABILISTYCZNE

Wyliczone wcześniej wskaźniki spójności sieci utworzonych w kolejnych latach z krawędzi podobieństwa są wymierną oceną strukturalnej morfologii pola, a ich zmienność w okresie wieloletnim stanowi wykładnię dynamiki zmian strukturalnych właściwości pola. Przechodząc obecnie do oceny „zachowania się” poszczególnych kontrastów w przekroju wieloletnim możemy określić prawdopodobieństwo, z jakim zachodzą relacje istotnego podobieństwa wzdłuż krawędzi sieci grafowej. Podobną, probabilistyczną analizę możemy przeprowadzić badając częstość pojawiania się przestrzennego podobieństwa w polach podstawowych sieci.

W postępowaniu analitycznym przyjęto algorytm zakładający *a priori* absolutną ciągłość pola opadów, tożsamą z wystąpieniem pozytywnych relacji podobieństwa z prawdopodobieństwem wynoszącym 100%. Następnie przyjęte założenie weryfikowano w ten sposób, że w polu tworzone kolejne grafy z tych krawędzi, wzdłuż których pozytywne relacje podobieństwa zachodziły z prawdopodobieństwem kolejno: 100%, powyżej 90%, powyżej 80%, powyżej 70%, powyżej 60% oraz powyżej 50%. Poszczególne grafy traktowano jako graficzną postać struktury pola opadów na różnych poziomach pluwiometrycznej ciągłości. Uznano, że krawędzie z mniejszym prawdopodobieństwem ($\leq 50\%$) relacji pozytywnych wyznaczają strefy zakłócenia ciągłości, bądź tworzą obszary nieciągłości w polu opadów. Należy zaznaczyć, że to arbitralne przyjęcie gradacji częstości relacji podobieństwa (co 10%) zostało podyktowane zamiarem ukazania dynamiki zmian



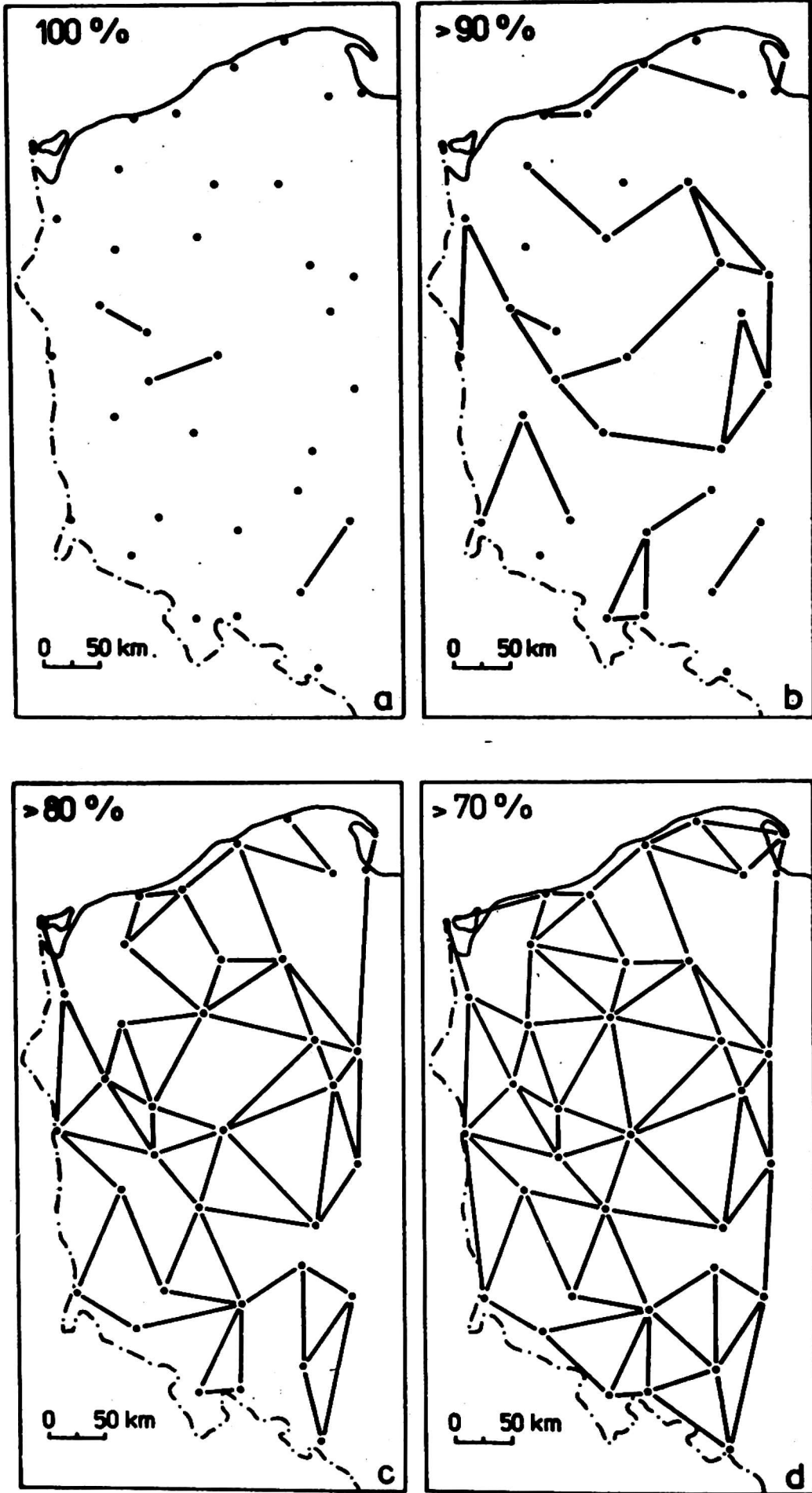
Rys. 4. Wieloboki podobieństwa. Przykład minimalnego (1962) oraz maksymalnego (1963) zasięgu występowania podobieństwa

Fig. 4. Polygons of similarity. An example of a minimum (1962) and a maximum (1963) extent of similarity

strukturalnych właściwości pola opadów w trakcie stopniowego rozluźniania ostrości kryteriów opadowej ciągłości.

Spośród 86 testowanych kontrastów w trzech stwierdzono relację istotnego podobieństwa we wszystkich 30 latach (100% częstości); rozmieszczenie krawędzi o najwyższym stopniu pluwiometrycznej ciągłości przedstawia rysunek 5a. Kolejne ujęcia graficzne (rys. 5b, c, d, e, f) ukazują geograficzną lokalizację krawędzi, które pojawiły się w polu opadów na kolejnych poziomach częstości pozytywnej relacji podobieństwa. Wspomniane struktury w wymierny sposób zostały wyrażone wartościami wskaźników spójności zamieszczonymi w tabeli 2.

Podsumowując ten etap badań ujęcie grafowe (rys. 6) przedstawia przestrzenny rozkład krawędzi łączących kontrasty o różnej częstości relacji wzajemnego podobieństwa. W polu opadów znalazło się łącznie 28 krawędzi z największą częstością podobieństwa – powyżej 90%. Większość z nich przebiega w obrębie nizinnej (środkowej) części obszaru badań oraz także na południu. Z kolei na Pojezierzu Pomorskim występują one sporadycznie. Najliczniej w polu opadów występują krawędzie „przenoszące” podobieństwo z częstością 71 – 90%. Są one powszechne na całym badanym obszarze. Natomiast w przedziale częstości poniżej 50% znalazły się trzy krawędzie: Gdańsk – Kartuzy, Kalisz – Ostrzeszów oraz Legnica – Jelenia Góra.



Kwestię zasięgu zwartych powierzchni utworzonych z pól podstawowych o różnym stopniu pluwiometrycznej ciągłości przedstawiono na rysunku 7 w formie kartogramu. Przedziały częstości ustalono (podobnie jak na rys. 6) względem głównej (centralnej) wartości progowej wynoszącej 50% (15 lat). Częstości powyżej tego progu oznaczają przewagę przypadków przestrzennego podobieństwa i zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami obszary tych wartości uznano za powierzchnie pluwiometrycznej ciągłości, w odróżnieniu od obszarów nieciągłości – z przewagą lat z relacjami negatywnymi. Te ostatnie obszary zakłócają (w różnym stopniu) zakładaną *ex definitione* ciągłość pola opadów. W ten sposób uzyskano formalną strukturę pola przebiegu wiekości sum miesięcznych.

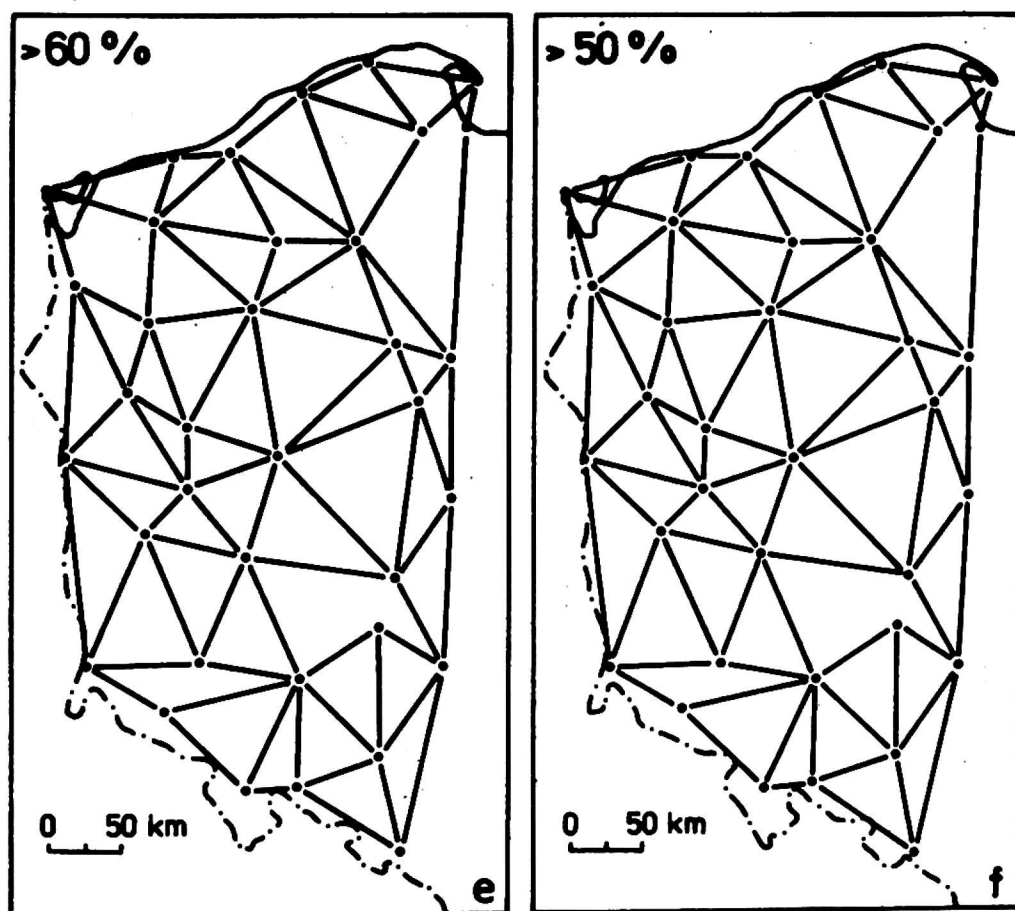
Uzyskane wyniki pozwalają – w podsumowaniu rozważań – na próbę delimitacji obszaru zachodniej części Polski na powierzchni o różnym stopniu pluwiometrycznej ciągłości oraz na powierzchni jej

Tabela 2 – Table 2

Spójność grafów o różnej częstości podobieństwa

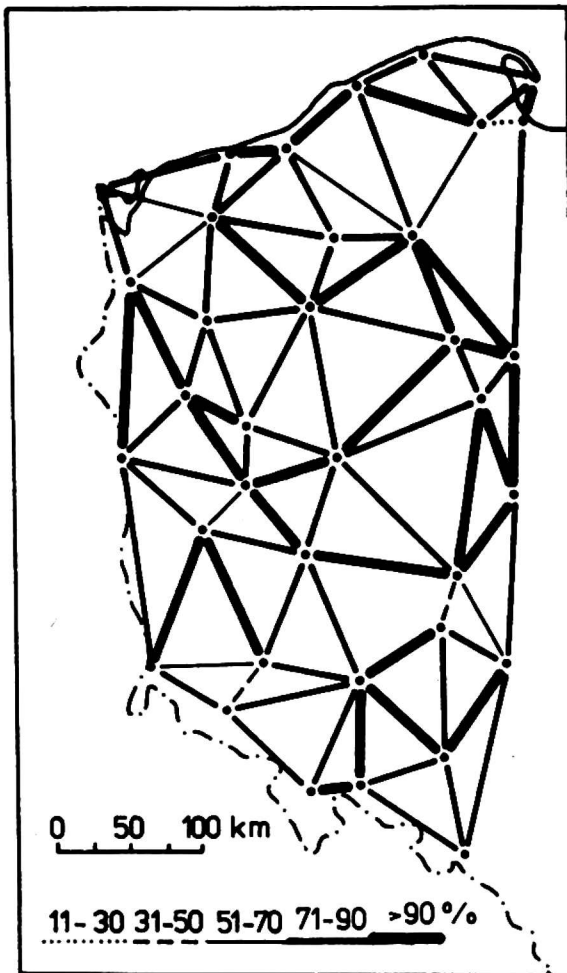
The connectivity of graphs of varying frequency of similarity

Częstość podobieństwa w % Frequency of similarity in %	Wskaźniki spójności Connectivity indices	
	γ	G
100	0,03	2,30
>90	0,32	1,61
>80	0,71	0,69
>70	0,88	0,28
>60	0,95	0,11
>50	0,96	0,08
>40	0,98	0,06

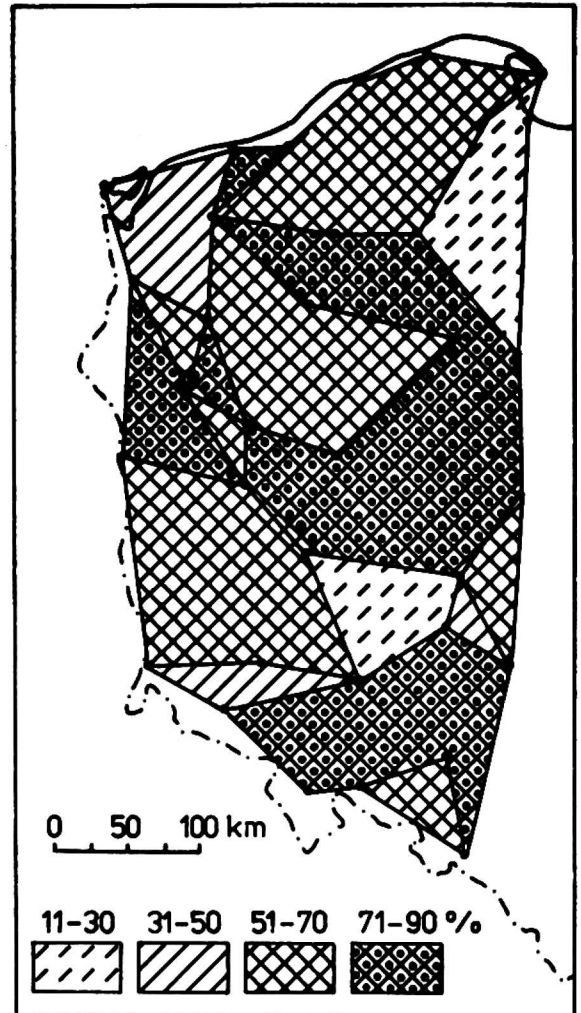


Rys. 5a, b, c, d, e, f. Krawędzie grafów o różnym prawdopodobieństwie podobieństwa przebiegu sum miesięcznych

Fig. 5a, b, c, d, e, f. The edges of graphs of different probabilities of the similarity of the patterns of monthly precipitations totals



Rys. 6. Graf strukturalny z krawędziami o różnych przedziałach częstości podobieństwa
Fig. 6. A structural graph with edges with various intervals of the frequency of similarity



Rys. 7. Struktura formalna pola opadów
Fig. 7. The formal structure of the precipitation field studied

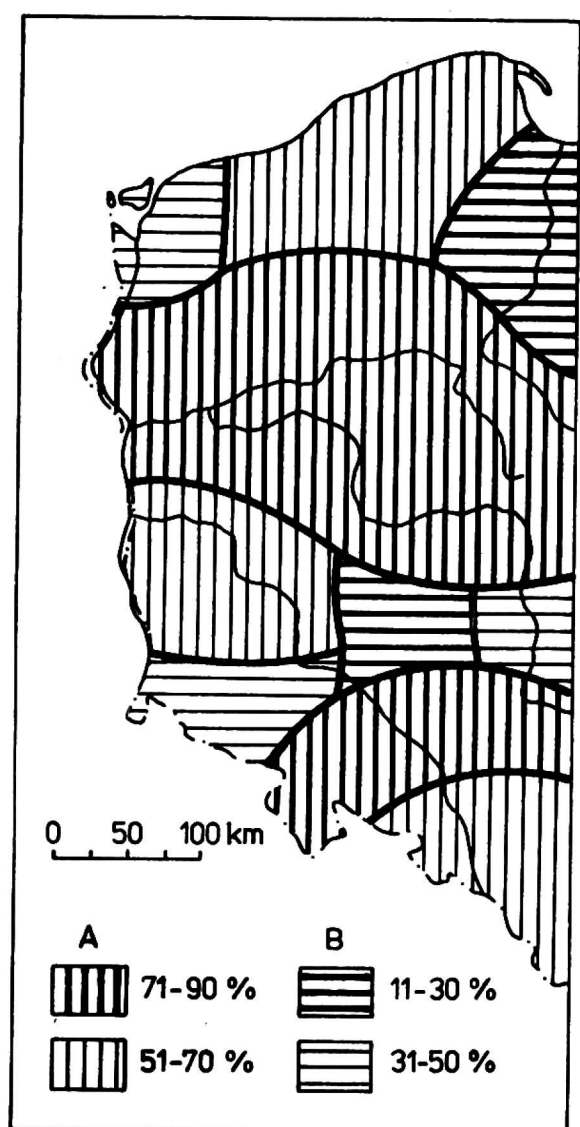
pozbawione. Transformując sformalizowane ujęcie geometryczne struktury pola do bardziej geograficznie logicznej postaci wzięto pod uwagę także układ fizycznogeograficznych jednostek regionalnych. Struktura pola ujęta probabilistycznie na rysunku 8, przedstawiająca zasięgi obszarów pluwiometrycznej ciągłości A oraz nieciągłości B, jest finalnym wizerunkiem strukturalnych własności zachodniej części pola opadów Polski w okresie 1951 – 1980.

Pluwiometryczna ciągłość w najsilniejszym tu stopniu (71 – 90%) pojawia się w dwóch zwartych obszarach. Na północy obejmuje Pojezierze Wielkopolskie oraz południowo-zachodni skłon Pojezierza Pomorskiego, czyli Pojezierze Myśliborskie. Na południu tworzy pas biegnący łukiem od Kotliny Kłodzkiej przez Góry Bardzkie, Wzgórza Strzebińskie, Równinę Niemodlińską aż do Równiny Opolskiej.

O ciągłości słabiej wyrażonej (51 – 70%) możemy mówić w przypadku najwyższych partii Pojezierza Pomorskiego wraz z Pobrzeżem Słowińskim. W tym samym stopniu ciągłości znajdują się ponadto: zachodnia część Niziny Śląskiej, Wał Trzebnicki oraz Wzniesienia Zielonogórskie, jak również obszar obejmujący część Niziny Śląskiej w obrębie Płaskowyżu Głubczyckiego i Kotliny Raciborskiej oraz południową część Równiny Opolskiej.

Z najsilniej wyrażonym stopniem nieciągłości (z prawdopodobieństwem podobieństwa 11 – 30%) mamy do czynienia na północy w obszarze południowo-wschodniego skłonu Pojezierza Pomorskiego – w obrębie Borów Tucholskich oraz fragmentów Doliny Dolnej Wisły, natomiast na południu w części Pojezierza Wielkopolskiego obejmującej południowy skłon Wysoczyzny Kaliskiej, Kotlinę Milicką oraz Wzgórza Trzebnickie i Wzgórza Ostrzeszowskie. Mniej zdecydowana nieciągłość pola opadów (31 – 50%) pojawiła się w trzech zwartych powierzchniach obszaru badań. Na północy objęła Pobrzeże Szczecińskie wraz z Niziną Szczecińską, w części środkowej – południową część Wysoczyzny Tureckiej oraz Kotlinę Sieradzką i Wysoczyznę Złoczewską, wreszcie na południu zaznaczyła się w obrębie Przedgórze Zachodniosudeckiego oraz Sudetów Zachodnich.

ZAKOŃCZENIE



Rys. 8. Obszary pluwiometrycznej ciągłości (A) oraz nieciągłości (B) w polu opadów

Fig. 8. Areas of pluviometric continuity (A) and discontinuity (B) in the precipitation field

Podjęta próba rekonstrukcji zdarzeń zachodzących w zachodniej części pola opadów Polski w latach 1951 – 1980 wykazała, iż grafowa metoda badania struktury pól meteorologicznych stanowi wygodny aparat formalny, pozwalający na identyfikację właściwości tych pól zarówno w przekroju wieloletnim, jak i w ujęciu probabilistycznym.

Stacjonarny charakter standardowych pomiarów meteorologicznych w sposób niejako naturalny zdaje się preferować ujęcia grafowe w badaniach przestrzennych klimatu, a zwłaszcza tych o relacyjnym charakterze. Wysoki poziom abstrakcji wynikający z podstaw teorii grafów pozwala bowiem na stosowanie technik grafowych do różnych sieci i w rozmaity sposób skonstruowanych. Wymaga to rzecz jasna sprecyzowania na wstępie szeregu założeń obejmujących takie zagadnienia jak: wybór charakteru badanych relacji i ich stosunek do klimatologicznego uogólnienia, sposób organizacji sieci badania relacji w polu meteorologicznym, przyjęcie metody lub metod testujących (weryfikujących) stawiane hipotezy oraz sformułowanie zasad wydzielenia obszarów o różnym stopniu ciągłości pola.

Grafowe modele towarzyszące procedurze analitycznej należy traktować jako pewną formę generalizacji przestrzennej, która nie zaw-

sze oznacza jedynie uogólnienie wynikające z selekcji bądź redukcji informacji pierwotnej, lecz z powodzeniem może pełnić także funkcje opisujące i wyjaśniające swoistość tzw. struktur ukrytych.

Wykorzystanie niektórych topologicznych własności sieci grafowych pozwala na kwantytatywną identyfikację strukturalnych cech pól meteorologicznych, umożliwiając także ich wymierną analizę porównawczą. Zaletą ujęć grafowych jest możliwość graficznej prezentacji zidentyfikowanych struktur, co ułatwia wizualną ocenę strukturalnej organizacji pola i w wielu przypadkach może z powodzeniem ułatwić, a nawet zastąpić klimatograficzny opis jego strukturalnych właściwości.

Wreszcie, względna łatwość adaptacji i znaczny stopień unifikacji ujęć grafowych sprawia, iż grafowe metody rozpoznawania struktur mogą być pożyteczne w badaniu pól wielu elementów meteorologicznych.

*Instytut Geografii Fizycznej
Uniwersytetu im. A. Mickiewicza
Zakład Klimatologii*

LITERATURA

- Abell P., 1971: Model building in sociology, London, (Tłum. pol., 1975: Modele w socjologii, Warszawa).
- Bielecki J., Jurkiewicz B., Szymanowska Z., 1975: Zbiór zadań ze statystyki ogólnej i matematycznej, Warszawa.
- Brázdil R., 1986: Variation of atmospheric precipitation in the CSSR with respect to precipitation changes in the European Region, Folia Fac. Sci. Nat. Univ. Purynianae Brunensis, Geographia 22.
- Cliff A. D., Ord J. K., 1973: Spatial autocorrelation, London.
- Czelnai R., 1966: Statistical structure of meteorological fields, Gerlands Beitr. Geoph. 75, s. 129-153.
- Czelnai R., Desi F., Rakoczi F., Szakacs A., 1967: Structural and autocorrelation functions of precipitation field, Idojávás, 67, s. 204-207.
- Deo N., 1974: Graph theory with applications to engineering and computer science, New Jersey, (Tłum. pol., 1980: Teoria grafów i jej zastosowanie w technice i informatyce, Warszawa).
- Ewert A., 1984: Opady atmosferyczne na obszarze Polski w przekroju wieloletnim, WSP, Słupsk.
- Ford L. R. Jr., Fulkerson D. R., 1962: Flows in networks, New Jersey, (Tłum. pol., 1969: Przepływy w sieciach, Warszawa).
- Greń J., 1982: Statystyka matematyczna. Modele i zadania, Warszawa.
- Kaczorowska Z., 1962: Opady w Polsce w przekroju wieloletnim, Prace Geogr. IG PAN, 33.
- Kansky K. J., 1963: Structure of transport networks: relationships between network geometry and regional characteristics, Univ. of Chicago, Dep. of Geogr., Research Papers, 84.
- Kirkby M. J., 1990: Modelling vegetation, water balance and sediment yield to forecast landscape change due to expected climatic change, (W:) Landscape – ecological impact of climatic change, M. M. Boer, R. S. DeGroot (red.), s. 161-176, Amsterdam.
- Korzan B., 1978: Elementy teorii grafów sieci. Metody i zastosowanie, Warszawa.
- Kożuchowski K., 1985: Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w stuleciu 1881 – 1980, Acta Geogr. Lodz., 48.
- Kożuchowski K., Wibig J., 1988: Kontynentalizm pluwialny w Polsce: zróżnicowanie geograficzne i zmiany wieloletnie, Acta Geogr. Lodz., 55.
- Kulikowski J. L., 1986: Zarys teorii grafów, zastosowania w technice, Warszawa.

- Kutiel H., 1982: Spatial coherence of monthly rainfall in Israel, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 31, s. 353-367.
- Lettau H., 1969: Evapotranspiration climatology. 1. A new approach to numerical prediction of monthly evapotranspiration runoff, and soil moisture storage, Monthly Weather Rev., 97, s. 691-699.
- Lityński J., 1969: Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski, Prace PIHM, 97, s. 3-15.
- Lockwood J. G., 1979: Causes of climate, London, (Tłum. pol., 1984: Procesy klimatotwórcze, Warszawa).
- Moolley D. A., Mohamed Ismail P.M., 1982: Structure functions of rainfall field and their application to network design in the tropics, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 30, s. 95-105.
- Pruchnicki J., 1987: Metody opracowań klimatologicznych, Warszawa.
- Pulczyn W., 1968: Elementy teorii grafów, Warszawa.
- Rapoport A., 1973: Zastosowanie izomorfizmów matematycznych w Ogólnej Teorii Systemów, Prakseologia, 2, s. 71-89.
- Sawicki J. M., 1988: Ewolucja pojęcia izotropii w naukach geofizycznych, Przegl. Geofiz., 33, 3, s. 239-253.
- Sharon D., 1974: The spatial pattern of convective rainfall in Sukumaland, Tanzania – a statistical analysis, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 22, s. 201-218.
- Taylor Z., 1980: Zastosowania metod grafowych do badania struktury sieci, Przegl. Zagr. Lit. Geogr., 4, s. 11-31.
- Trepińska J., 1988: Wieloletni przebieg ciśnienia i temperatury powietrza w Krakowie na tle ich zmienności w Europie, Rozprawy Habil. UJ, 140.
- Warakomski W., 1969: Częstość występowania dni i okresów z poszczególnymi typami mas powietrza nad Polską (1951 – 1960), Przegl. Geofiz., 14 (22), 1, s. 67-77.
- Zagożdżon A., 1977: Wykorzystanie metod i technik grafowych w analizie struktur przestrzennych, (W:) Metody ilościowe i modele w geografii, Z. Chojnicki (red.), s. 158-169, Warszawa.

A GRAPH METHOD OF STUDYING THE STRUCTURE OF METEOROLOGICAL FIELDS – ON THE EXAMPLE OF THE WESTERN PART OF POLAND'S PRECIPITATION FIELD

Summary

By adapting some elements of graph theory, a graph network was created for the study of the structure of a precipitation field consisting of 36 vertices (meteorological stations) and 86 edges. The similarity of the patterns of monthly precipitation totals at the pairs of stations joined by an edge was examined for each year in the period of 1951-1980. The evaluation of the character of the similarity relation was made using the *t*-statistical test of difference between two means. For each year, significant similarity edges were combined to form a suitable similarity graph, and the connectivity indices of the created graph networks were calculated. The examination of the probability of occurrence of the similarity relation along each of the edges of the original graph provided a basis for a graphic presentation of the formal structure of the precipitation field and for the division of the study area into areas of pluviometric continuity or discontinuity.

*Institute of Physical Geography
Adam Mickiewicz University in Poznań
Department of Climatology*