

**METODY ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWEJ
W BADANIACH KLIMATOLOGICZNYCH
(NA PRZYKŁADZIE POLSKI)¹**

**SPATIAL-TEMPORAL METHODS
IN THE CLIMATOLOGICAL RESEARCH
(BASED ON THE EXAMPLE OF POLAND)**

Zbigniew Ustrnul ^{1,2}, Danuta Czekierda ²

¹ Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec

² Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział w Krakowie

Słowa kluczowe: analiza przestrzenna, analiza czasowa, klimatologia, GIS
Keywords: spatial analysis, temporal analysis, climatology, GIS

Wstęp

Przełom XX i XXI przyniósł znaczny postęp w rozwoju nowych metod badawczych w większości dyscyplin naukowych, który niewątpliwie wiąże się z gwałtownym rozwojem komputeryzacji. Także w badaniach klimatologicznych postęp taki daje się łatwo zauważyć, co związane jest przede wszystkim z automatycznym zbieraniem informacji meteorologicznej i z powstaniem potężnych cyfrowych baz danych. Dane te z kolei umożliwiają zastosowanie przy ich przetwarzaniu wiele nowych metod i technik, które z jednej strony ułatwiają wykonywanie różnego rodzaju opracowań, z drugiej natomiast pozwalają na ich wnikliwszą i pełniejszą analizę. Najbardziej rozbudowaną i cenną taką metodą – narzędziem jest system informacji geograficznej (GIS, ang. *Geographic Information System*), którego dynamiczny rozwój można obserwować na całym świecie w ostatnich kilkunastu latach. Metody GIS są szczególnie przydatne w badaniach przestrzennych do konstrukcji różnego rodzaju map. Jednocześnie pozwalają na analizę zmienności czasowej, choć w dostępnym obecnie oprogramowaniu odczuwa się pewien niedosyt procedur służących ocenie zmian w czasie. Współczesne badania klimatu obejmują tak analizę w różnych skalach przestrzeni jak i czasu. Dlatego wymienione cechy GIS doskonale predestynują go do zastosowania w badaniach klimatologicznych.

¹ Praca została wykonana dzięki projektowi nr 618/E-217/SPB/COST/KN/DWM50/2005-2006 oraz środkom finansowym na naukę w latach 2006-2008 jako projekt badawczy nr COST/2/2006.

Wykorzystanie metod GIS w klimatologii, mimo znacznego postępu dokonanego w ostatnich latach, jest wciąż w Polsce stosunkowo ograniczone. Oczywiście można znaleźć wiele przykładów zastosowania GIS, ale na ogół dotyczą one małych regionów lub też wąskich zagadnień (np. Trafas, Pyka, 1997; Sobik, Netzel, Quiel 2001; Sobolewski, 2001; Bac-Brownicz, 2003; Quiel, Sobik, Rosiński, 2003; Stach, Tamulewicz, 2003; Frączek, Bytnerowicz, 2004). Nieco lepsza sytuacja w tym zakresie jest za granicą, gdzie w poszczególnych krajach można znaleźć ciekawe przykłady (Müller-Westermeier et al., 1999; Auer et al., 2000; Dobesch, Tveito, Bessemoulin, 2001; Brown, Comrie, 2002; Chapman, Thornes, 2003). Zastosowaniu metod GIS w klimatologii i meteorologii poświęcony był też specjalny program badawczy Unii Europejskiej COST 719 „Zastosowanie GIS w klimatologii i meteorologii”, w ramach którego wymieniono wzajemne doświadczenia oraz wypracowano wiele wniosków i zaleceń dotyczących danych i narzędzi GIS, metod interpolacji oraz zastosowań w obu dziedzinach (Dyras et al., 2005; Tveito, 2006).

Celem artykułu jest przedstawienie różnych przykładów analizy przestrzennej i czasowej zastosowanych w badaniach klimatologicznych. Są one oparte na badaniach polskich, jednak z odwołaniem się do literatury zagranicznej, w której takich przykładów można obecnie znaleźć już całkiem sporo.

Analiza przestrzenna

Na wstępie należy zwrócić uwagę na podstawowy problem, jaki napotyka się przy opracowaniach map klimatycznych. Jest nim dokonanie wnikliwej analizy przestrzennej danych pomiarowych, ciągle na ogół pochodzących z danych punktowych. Celem uzyskania wartości w pozostałych punktach dokonuje się interpolacji przestrzennej, której jednak nie należy utożsamiać z prostą geometryczną czy matematyczną analizą. W analizie tej, przy użyciu różnych mniej lub bardziej skomplikowanych metod wykorzystuje się wiedzę o rozkładzie przestrzennym rozpatrywanej zmiennej i przede wszystkim jego uwarunkowaniach. Często wykorzystuje się w tym celu dodatkowe zmienne objaśniające, jak choćby na przykład informację o rzeźbie terenu (wysokość nad poziomem morza, nachylenia stoków etc). Dlatego w takim przypadku bardziej adekwatny jest termin spacializacja², który niestety nie wszedł jeszcze na stałe do polskiej literatury, mimo, że w obcych pozycjach można go często spotkać (Tveito, Schöner 2002; Tveito, 2006). Niekiedy używa się terminu interpolacja przestrzenna, który jednak nie wydaje się być w pełni zadowalający. Tak więc spacializacja powinna być znacznie szerzej traktowana niż interpolacja, opiera się ona bowiem na wielu dodatkowych przesłankach (zmiennych), które nie są uwzględniane przy zwykłej interpolacji. Różnego rodzaju oceny ilościowe jednoznacznie potwierdzają, że zastosowanie większości metod spacializacji wykorzystujących dodatkowe zmienne objaśniające pozwala na precyzyjniejszą konstrukcję rozpatrywanych pól klimatycznych. Jednocześnie tylko takie metody pozwalają na analizę danych, których wartości mogą przekraczać wartości danych wyj-

² Komentarz redakcji: jest to anglicyzm pochodzący od *spatialization*, stosowany w geomatyce w różnych odcieniach znaczeniowych, na ogół w sensie analizowania, ujmowania, opisywania w pewnej realnej lub umownej przestrzeni, może dotyczyć danych przestrzennych i nieprzestrzennych. Spacializacja kojarzy się ze spacją, a nie z przestrzenią. Proponuje się rozważyć wprowadzenie neologizmu *przestrzenizacja*.

ściowych (w punktach pomiarowych). Tak więc, w wyniku spacji wartości możemy otrzymać wartości z szerszego spektrum, niż przy zwykłej interpolacji. Ma to istotne znaczenie przy analizie różnego rodzaju wartości ekstremalnych, które ostatnio są szczególnie często podejmowanym zagadnieniem.

Rozważając spacji wartości pod uwagę bierze się standardowe dane klimatyczne, które sprowadzają się do ich określonych wartości w punktach. Jednak w związku z szybkim rozwojem technik teledetekcyjnych (satelitarnych, radarowych) rozważa się również możliwość zastosowania danych przestrzennych. Niestety prace mające na celu ich wykorzystanie i wzajemną integrację z danymi naziemnymi są jeszcze na etapie poszukiwań i eksperymentów (Dyras, Serafin-Rek, 2005).

Wyniki każdej zastosowanej metody interpolacji/spacji wartości należy szczegółowo ocenić przed formułowaniem ostatecznych wniosków. Oczywiście na wstępie warto dokonać wizualnej oceny (Magnuszewski, 1999), ale następnie konieczne jest przeprowadzenie wnikliwej ilościowej kontroli (tzw. walidacji). W klimatologii najczęściej do oceny metody stosuje się procedurę cross-walidacji (Tveito, 2006). Precyzję zastosowanej metody ocenia się za pomocą kilku znanych miar, które mogą być wykorzystane przy większości stosowanych metod. Wszystkie one określają podobieństwo pomiędzy wartościami obserwowanymi a estymowanymi i mogą być stosowane do oceny na próbach zależnych jak i niezależnych. Są nimi: błąd średni (*mean error* – ME), średni błąd kwadratowy (*mean square error* – MSE), błąd pierwiastka średniego kwadratowego (*root mean square error* – RMSE), współczynnik korelacji lub wariancja (r lub r^2) oraz rzadziej spotykany współczynnik efektywności NS (*Nash – Sutcliffe efficiency criterion* – NS; Nash, Sutcliffe, 1970).

Metody spacji wartości w opracowaniach klimatologicznych i ich przykłady

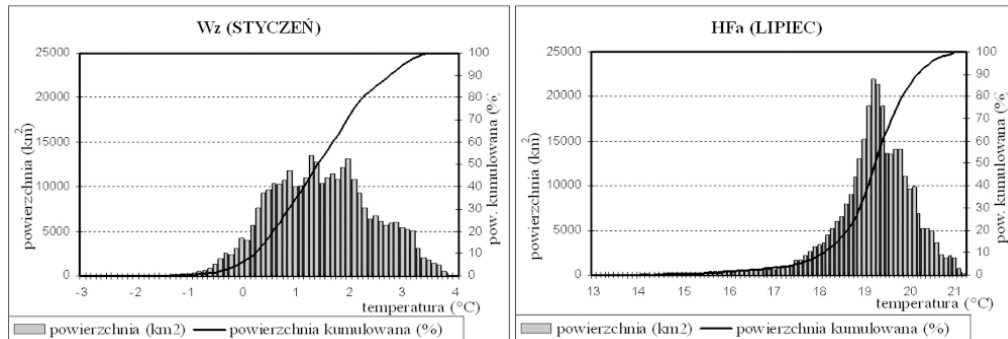
Jak powszechnie wiadomo istnieje wiele metod spacji wartości/interpolacji, których przegląd można znaleźć w literaturze (Cressie 1993, Wackernagel 1995, Tveito, Schöner 2002). W zależności od kryterium dokonano różnych podziałów metod. W raporcie końcowym Akcji COST 719, stanowiącym m. in. podsumowanie badań nad rozkładami przestrzennymi różnych elementów klimatu w różnych obszarach, wyróżniono 4 zasadnicze grupy: metody deterministyczne, metody probabilistyczne (stochastyczne), sztuczne sieci neuronowe oraz tzw. metody fizyczne (Tveito, 2006). Należy jednak dodać, że powyższy podział nie obejmuje wszystkich istniejących metod i jest tylko jednym z możliwych.

Literatura polska, jak i przede wszystkim zagraniczna, jednoznacznie świadczy, że w klimatologii brak jednej uniwersalnej metody spacji wartości czy też zwykłej interpolacji, którą można stosować do wszystkich elementów klimatu. Ponadto, choćby doświadczenia autorów wskazują, że metody takiej brak również w odniesieniu do tego samego elementu, ale rozpatrywanego w różnych skalach tak przestrzennych jak i czasowych. Oznacza to, że na przykład kriging resztowy najlepszy przy interpolacji dla całej Polski średniej miesięcznej lub sezonowej temperatury może okazać się gorszą metodą przy analizie w skali małego regionu czy też powiatu, podobnie jak też przy analizie temperatury w skali średniej dobowej czy też terminowej.

Poniżej zamieszczono kilka przykładów spacializacji, w wyniku których otrzymano stosunkowo dokładne rozkłady przestrzenne rozpatrywanych elementów. Przy weryfikacji wzięto pod uwagę błąd średniej (ME), błąd średni kwadratowy (MSE), a w przypadku stosowania typów cyrkulacji jako zmiennej objaśniającej również współczynnik korelacji (r).

Temperatura powietrza – jeden z dwóch przewodnich elementów klimatu – należy do stosunkowo prostych zmiennych w analizie przestrzennej. Zawdzięcza to swojemu ciągłemu charakterowi rozkładu oraz stosunkowo dobrze rozpoznany umiarunkowaniom środowiskowym. Powoduje to, że przy jej spacializacji można wykorzystać wiele dodatkowych zmiennych objaśniających, które w znaczny sposób wpływają na jej rozkład. Rysunek 3 przedstawia rozkład średniej miesięcznej temperatury powietrza w styczniu, który z teoretycznego punktu widzenia odpowiada średniej dobowej temperaturze tego miesiąca przy założeniu stałych warunków termicznych. Innymi słowy, taka średnia miesięczna mogłaby wynikać z takich samych wszystkich 31 średnich dobowych. Jednak jak wiadomo, wahania średniej dobowej temperatury w skali Polski są znaczne, stąd takie rozpatrywanie średniej dobowej temperatury w skali całego miesiąca pozbawione jest sensu. Średnią dobową temperaturę w takim przypadku można rozpatrywać w poszczególnych typach cyrkulacji, w ramach których wahania podlegają już stosunkowo niewielkim zmianom. Dla przykładu na rysunku 3 przedstawiono też rozkłady średniej dobowej temperatury powietrza dla dwóch najczęściej występujących typów cyrkulacji określonych według znanego kalendarza „Grosswetterlagen” (Hess, Brezowsky, 1952; Gerstengarbe, Werner, 1993), tj. typu Wz (zachodni, cyklonalny) oraz BM (klin – wał – wyżowy nad Europą Środkową). Walidacja metody wykazała, że najczęściej uwzględnienie typów cyrkulacji zmniejsza błędy estymacji, co oznacza, że warto ją stosować. Taka jednak sytuacja nie wystąpiła przy kilku typach, kiedy brak był wyraźnej adwekcji mas powietrza. W takich wypadkach, kiedy często występują inwersje temperatury, uwzględnienie typów cyrkulacji nie jest wskazane. Ze względu na niezbyt liczne próby danych, wyniki te należy jeszcze zweryfikować na znacznie liczniejszych zbiorach danych. Uwzględniając powyższe, można jednak stwierdzić, że typ cyrkulacji należy traktować jako bardzo cenną dodatkową zmienną objaśniającą. Staje się ona wówczas nawet zasadniczą zmienną, dzięki której możliwa jest już dokładna spacializacja wybranego elementu za pomocą poszczególnych metod. W rozpatrywanym przypadku zastosowano sprawdzoną już wcześniej metodę krigingu resztowego, przy czym zmienne objaśniające stanowiły: długość i szerokość geograficzna, wysokość nad poziomem morza oraz odległość od linii brzegowej Bałtyku.

Podobny rozkład jak dla stycznia, zaprezentowano też dla lipca, uwzględniając obok wartości średnich, również te same najczęściej występujące typy cyrkulacji Wz i BM (rys. 4). Metoda postępowania była identyczna jak wyżej. Jak widać, rozkłady przestrzenne są zupełnie inne biorąc pod uwagę nie tylko wartości, ale także kształt i przebieg izoterm. Reasumując, należy stwierdzić, że uwzględnienie typów cyrkulacji w analizach przestrzennych wydaje się obiecującym kierunkiem badań w klimatologii. Pewne tego symptomy można znaleźć w literaturze (Kilsby et al., 1998; Tveito, 2002; Tveito, Ustrnul, 2003; Ustrnul, Czekierda, 2005a). Cyfrowa konstrukcja map pozwala na łatwe obliczanie różnych praktycznych wskaźników. Wykorzystując wyżej przedstawione ujęcie, na rysunku 1 skonstruowano wykresy przedstawiające powierzchnię Polski objętą występowaniem określonej średniej dobowej temperatury przy danym typie cyrkulacji w styczniu (dla typu Wz) oraz w lipcu (dla typu HFa – wyż nad Fennoskandią, sytuacja antycyklonalna). Analiza taka pozwala na ocenę warunków termicznych dla każdej doby i tym samym może być bardzo przydatna w planowaniu i prognozowaniu różnych działań o charakterze gospodarczym.



Rys. 1. Rozkłady powierzchniowe dla Polski średniej dobowej temperatury powietrza przy typie cyrkulacji Wz w styczniu oraz typie HFa w lipcu

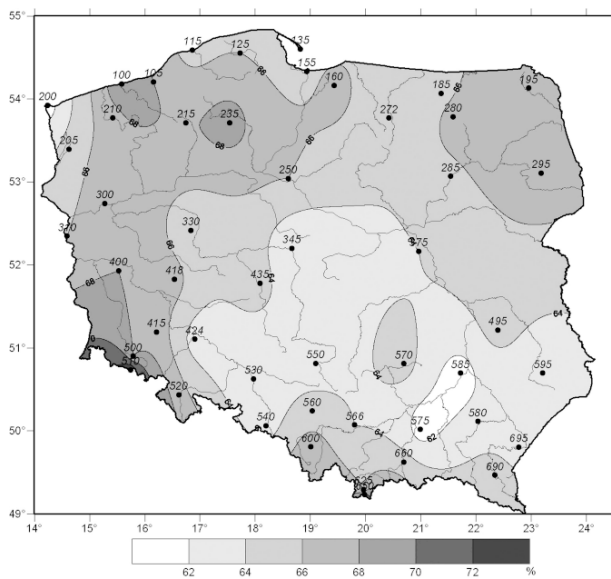
Uwzględniając doświadczenia polskie, jak i wyniki analiz pochodzących z kilku krajów Europy, można uznać, że kilka metod analizy przestrzennej średnich temperatur powietrza daje zadowalające wyniki. Trudno jednak jednoznacznie odpowiedzieć, która z nich jest najbardziej efektywna. Najlepsze wyniki uzyskiwano stosując metody: regresji wielokrotnej, kokrigingu oraz krigingu resztowego.

Obok temperatury powietrza, za drugi przewodni element klimatu uważa się opad atmosferyczny. W klimatologii najczęściej operuje się sumami opadów, przy czym najczęściej oblicza się je dla doby, miesiący oraz poszczególnych sezonów. Ze względu na nieciągły charakter tego elementu, jak i bardzo dużą jego przestrzenną i czasową zmienność opady atmosferyczne uchodzą za jedną z najtrudniejszych wielkości do analizy przestrzennej. Świadczą o tym choćby prace tak polskie (Sobolewski, 2001; Stach, Tamulewicz, 2003) jak i zagraniczne (Trigo, DaCamara, 2000; Tveito, 2002). W ich przypadku brak jest powszechnie stosowanej metody spacjalizacji. Dodatkowe zmienne objaśniające nie zawsze w jednoznaczny sposób mogą polepszyć analizę. Tak na przykład uwzględnienie wysokości nad poziomem morza jest pomocne tylko do określonej wysokości, którą jest średni poziom kondensacji pary wodnej. Również rola wysokości względnych czy też ekspozycji stoków może być wątpliwa, w przypadku gdy lokalna cyrkulacja atmosfery jest znacząca. Dlatego przy analizie przestrzennej tego elementu należy dysponować jak najgęstszą siecią danych pomiarowych, przy czym dokładność spacjalizacji wzrasta w miarę zwiększania się ich kroku czasowego. Innymi słowy analizując średnią sumę roczną opadów popełni się mniejszy błąd niż przy rozpatrywaniu sum miesięcznych, nie wspominając już o sumach dobowych. Rozkłady sum chwilowych opadów, np. godzinnych są wykonywane, ale ich obraz ma tylko orientacyjny charakter. Dodatkowo, ze względu na niewielką na ogół liczbę punktów pomiarowych ich ilościowa ocena jest bardzo utrudniona. Pewnej szansy na częściowe choćby rozwiązanie tego problemu należy upatrywać w wykorzystaniu przestrzennych danych teledetekcyjnych (np. satelitarnych). Jednak dotychczas podejmowane w tym zakresie próby, nawet z wykorzystaniem danych z satelitów meteorologicznych tzw. drugiej generacji, nie dają na razie pozytywnych wyników.

Rysunek 5 prezentuje sumy roczne opadów atmosferycznych oraz ich rozkład powierzchniowy dla najbardziej zróżnicowanych fizjograficznie obszarów w Polsce: województwa małopolskiego oraz dorzecza Dunajca. W obu przypadkach mapy skonstruowano, po wielu

próbach, również metodą krigingu resztowego, przy czym za zmienną objaśniającą wzięto tylko wysokość nad poziomem morza. Uwzględnienie tej metody było możliwe ze względu na wykorzystanie danych z około 310 stacji i punktów pomiarowych położonych na obszarze województwa lub w jego najbliższym sąsiedztwie. Jednocześnie dysponowano wynikami pomiarów pochodzących z najwyższych punktów pomiarowych na obszarze Tatr (Kasprowy Wierch, Łomnica). Było to jednak możliwe tylko dla dziesięciolecia 1993–2002 i tylko dla sum sezonowych i rocznych. Metody tej bez sprawdzenia nie powinno się więc stosować dla sum miesięcznych i dobowych, a na pewno już przy znacznie mniejszej liczbie punktów pomiarowych. Wyniki oceny metod zastosowanych w metodycznej pracy Stacha i Tamulewicza (2003) wykazały, że różnice są stosunkowo nieznaczne, choć w rankingu najlepsza okazała się metoda minimalnej krzywizny. Autorzy zastrzegają jednak, że bardzo duże znaczenie na ocenę ma struktura danych, która bezpośrednio wpływa na wielkość miar estymacji (walidacji). Przykłady z kilku krajów europejskich (Tveita, 2006), a także praca Sobolewskiego (2001), wskazuje na stosunkowo dużą precyzję metody odwróconych odległości ważonych (*inverse distance weighting* – IDW).

Pozostałe elementy klimatu były niezwykle rzadko analizowane przestrzennie. Wynika to przede wszystkim z braku znajomości uwarunkowań ich rozkładów i tym samym określonych zmiennych objaśniających. W przypadku, gdy rozkłady badanych zmiennych są chaotyczne i bardzo słabo związane z warunkami lokalnymi wydaje się, że w pierwszym etapie należy polecić zastosowanie zwykłego krigingu. Analiza semiwariogramu powinna pomóc w doborze parametrów interpolacji. Zwykły kriging można polecić zwłaszcza przy elementach, które bezpośrednio podlegają wpływowi cyrkulacji atmosferycznej. Tak na przykład ma to miejsce w przypadku zachmurzenia, którego rozkład tą metodą został wykonany z najmniejszym błędem dla Polski (rys. 2).



Rys. 2. Średnie roczne zachmurzenie ogólne (w %) w Polsce (1961–1990)

Poszczególne metody analizy przestrzennej można stosować do innych pochodnych charakterystyk i miar klimatologicznych. Dla przykładu na rysunku 6 zamieszczono rozkład współczynnika korelacji pomiędzy bardzo znanym, wręcz powszechnie stosowanym, wskaźnikiem cyrkulacji Północnoatlantyckiej (NAO) a średnią temperaturą stycznia. W pierwszym przypadku (lewa strona) zastosowano zwykły kriging, w drugim (prawa strona) metodę regresji wielokrotnej, z wykorzystaniem współrzędnych geograficznych jako dodatkowych zmiennych. Choć rozkład wykonany przy pomocy regresji wielokrotnej jest dokładniejszy, to wartości ME i MSE wskazywały tylko na nieznacznie mniejszą precyzję metody krigingu.

Klimatologia gridowa a metody zmienności czasowej

Metody GIS wraz z wyżej wspomnianymi procedurami spacjalizacji pozwalają na tworzenie nowego rodzaju danych zapisanych w określonym układzie regularnym, najczęściej kartezjańskim. Dzięki temu można wygenerować potężne pliki danych, które mogą być podane dalszemu przetwarzaniu. Oczywiście jakość i jednorodność tych danych zależy od dokładności wykorzystanej metody spacjalizacji, jak i od samego charakteru rozpatrywanej zmiennej. Dane te jednak stanowią podstawę tzw. klimatologii gridowej (Tveito et al., 2005; Ustrnul, Czekierda, 2005b) i bardzo dobrze nadają się do analizy zmienności czasowej. Ich przykład zawiera rysunek 7, na której przedstawiono odchylenia średniej temperatury zimy (XII–II) w okresie 1951–2006 od wartości średniej wieloletniej. Odchylenia te są średnimi wartościami dla poszczególnych długości geograficznych i zostały wyliczone dla wszystkich punktów gridowych, jakie znalazły się na obszarze Polski. Gridy te wyznaczono co 10 km, co pozwala na wystarczająco wnikliwą analizę warunków termicznych. Z rysunku tego (część lewa) można szczegółowo zorientować się w odchyleniach i anomaliach termicznych poszczególnych zim całego rozpatrywanego wielolecia. Widoczna jest na przykład bardzo mroźna zima 1962/1963, seria zim połowy lat 80. czy też zima 1996/1997. Ostatnia zima 2005/2006 z bardzo mroźnym styczniem 2006 roku na wykresie nie wyróżnia się szczególnie, co związane jest ze stosunkowo ciepłym grudniem roku poprzedniego.

Mapy i obrazy cyfrowe pozwalają ponadto na prowadzenie wielu wnikliwych badań dotyczących również zmienności czasowej. Na rysunku 7 (część prawa) zamieszczono wykres odchyleń wszystkich okresów zimowych 1951–2006. Z wykresu można odczytać np., że anomalie powyżej 4°C objęły zaledwie 3 tys. km², natomiast najmniejsze odchylenia w granicach $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ zajmowały powierzchnię aż blisko 120 tys. km², co stanowi przeszło 1/3 powierzchni Polski. Podobne analizy obejmujące określone progi termiczne, czy też poszczególne podokresy lub nawet pojedyncze sezony można przeprowadzać w ten sam sposób.

Oczywiście zmienność czasowa może być analizowana za pomocą znanych metod statystycznych jak np. odchylenia standardowego, wskaźnika zmienności czy trendu czasowego. Wszystkie one nadają się do przestrzennej wizualizacji i w dość precyzyjny sposób informują o czasowych wahaniami pogody i klimatu na określonym obszarze (Ustrnul, Czekierda, 2005b). Do monitoringu klimatu przydatna jest również prosta analiza porównawcza prowadzona w skali roku czy też sezonów. Przy analizie przestrzennej wyżej wymienionych miar statystycznych istnieje tylko problem doboru właściwej metody spacjalizacji. Ponieważ w tym przypadku na ogół trudno o fizyczne przesłanki uwarunkowań poszczególnych wskaźników, dlatego w pierwszym kroku należy polecić zwykłą interpolację z wykorzystaniem krigingu. W przypadku znalezienia dodatkowych zmiennych objaśniających można próbować stosować inne metody.

Wnioski

System informacji geograficznej będący współcześnie stosowanym narzędziem w wielu naukach, w tym zwłaszcza w naukach o Ziemi, może być z powodzeniem wykorzystany w badaniach klimatu i jego elementów. Ze względu na przestrzenną, jak i przede wszystkim czasową zmienność klimatu, zastosowanie GIS wydaje się tu nawet konieczne. Wnosi on bowiem zupełnie nową jakość do badań klimatologicznych, pozwalając na cyfrową analizę danych i ich prezentację. Stwarza to praktycznie nieograniczone możliwości w dalszym przetwarzaniu informacji klimatologicznej, zarówno w analizie przestrzennej jak i czasowej.

W badaniach klimatologicznych brak uniwersalnych metod spacji, które mogą być stosowane przy analizie poszczególnych elementów klimatu. Prawie każdy element, a także skala przestrzenna i czasowa wymagają indywidualnego podejścia i wykorzystania różnych metod. Analizy przeprowadzone dla pola temperatury powietrza wskazują, że najbardziej precyzyjne są metody krigingu resztowego oraz regresji wielokrotnej. W przypadku sum opadów atmosferycznych, ze względu na ich niesłychanie duże zróżnicowanie przestrzenne i czasowe, trudno jednoznacznie wskazać na najlepsze metody spacji. Wyniki większości prac sugerują, że w przypadku sum miesięcznych i sezonowych najbardziej precyzyjne rezultaty osiągnęto wykorzystując metodę IDW oraz kriging resztowy. W przypadku innych elementów trudno o jakieś konkluzje, co oznacza, że w każdej analizie należy poddać testowi kilka metod, włącznie ze zwykłym krigingiem.

Wykorzystując metody analizy czasowej można wykorzystywać znane powszechnie miary statystyczne, które następnie należy poddać rozkładowi przestrzennemu. Jednak w wielu analizach szczególnie przydatne będzie podejście gridowe, które zapewnia stosunkowo łatwe i efektywne przetwarzanie danych.

Zastosowanie wszystkich metod – narzędzi GIS w badaniach klimatologicznych wymaga jednak znacznej ostrożności. W każdym przypadku należy zwracać uwagę na założenia stosowanej metody. Dotyczy to zwłaszcza metod spacji i wykorzystania dodatkowych zmiennych objaśniających. Zmiennych tych należy ciągle poszukiwać, wykorzystując przy tym doświadczenia uzyskane przy badaniu poszczególnych elementów pogody i klimatu. Przy analizie poszczególnych elementów klimatu zaleca się sprawdzenie więcej niż tylko jednej metody interpolacji. Oprócz wizualnej oceny wyników należy dokonać walidacji ilościowej stosując określone miary. W pełni wiarygodna ocena musi być oparta na więcej niż jednym tylko wskaźniku walidacji.

Literatura

- Auer I., Böhm R., Mohnl H., Potzmann R., Schöner W., 2000: OKLIM – Digital Climatology of Austria 1961-1990, Proceedings of 3rd European Conference on Applied Climatology (ECAC 2000), Pisa, Italy, CD-ROM.
- Bac-Bronowicz J., 2003: Methods of the visualisation of precipitation based on various observation measurement periods in GIS, [w:] Man and climate in the 20th century, *Studia Geograficzne* 75, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław, 559-563.
- Brown D.P., Comrie A.C., 2002: Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA, *Climate Research*, Vol. 22, 115-128.
- Chapman L., Thornes J.E., 2003: The use of geographical information systems in climatology and meteorology, *Progress in Physical Geography*, Vol. 27, No. 3, 313-330.
- Cressie N.A.C., 1993: Statistics for spatial data, revised edition, Wiley, New York, s. 900.
- Dobesch H., Tveito O.E., Bessemoulin P., 2001: Final Report Project no. 5 in the framework of the climatological projects in the application area of ECSN. *Geographic Information Systems in Climatological Application*, DNMI, KLIMA, Oslo.

- Dyras I., Dobesch H., Grueter E., Perdigao A., Tveito O.E., Thornes J.E., Van der Wel F., Bottai L., 2005: The use of Geographic Information System in climatology and Meteorology: COST 719, *Meteorol. Appl.*, 12, 1-5.
- Dyras I., Serafin-Rek D., 2005: The application of GIS technology for precipitation mapping, *Meteorol. Appl.*, 12, 69-75.
- Frączek W., Bytnerowicz A., 2004: Geostatistics as a tool for evaluation of ambient ozone distribution models in the Tatra Mountains, [W:] A message from the Tatra – Geographical Information Systems and Remote Sensing in Mountain Environmental Research, Kraków – Riverside, Jagiellonian University Press, 47-61.
- Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C., 1993: Katalog der Grosswetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881-1992. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 113, Offenbach am Main.
- Hess, P., Brezowsky, H., 1952: Katalog der Grosswetterlagen Europas, Ber. Dt. Wetterdienst in US-Zone, Nr. 33.
- Kilsby, C.G., Cowpertwait, P.S.P., O'Connell, P.E., Jones, P.D., 1998: Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables, *Int. J. Climatol.* 18, 523-539.
- Magnuszewski A., 1999: GIS w geografii fizycznej, PWN, Warszawa.
- Müller-Westermeier G., Kreis A., Dittmann E., 1999: Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 1, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970: River flow forecasting thorough conceptual models, part 1 – A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10 (39), 282-290.
- Quiel F., Sobik M., Rosiński D., 2003: Spatial analysis of air temperature trends in Europe with the use of GIS, [w:] Man and climate in the 20th century, *Studia Geograficzne* 75, Wyd. Uniw. Wrocławskiego, Wrocław, 541-550.
- Sobik M., Netzel P., Quiel F., 2001: Zastosowanie modelu rastrowego do określenia pola rocznej sumy opadów atmosferycznych na Dolnym Śląsku, Uniwersytet Gdański, *Rocz. Fizycznogeograficzny*, T. VI, 27-34.
- Sobolewski W., 2001: Numeryczna mapa opadów atmosferycznych dla dorzecza Wisły, Uniwersytet Gdański, *Rocz. Fizycznogeograficzny*, t. VI, 79-84.
- Stach A., Tamulewicz J., 2003: Wstępna ocena przydatności wybranych algorytmów przestrzennej estymacji miesięcznych i rocznych sum opadów na obszarze Polski, [W:] Kostrzewski, Szpikowski (red.). Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych, Tom 3, Instytut Badań Czwartorzędu i Geoekologii UAM, Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań, 87-111.
- Trafas K., Pyka K., (red.) 1997: Komputerowy atlas województwa krakowskiego, Urząd Wojewódzki w Krakowie.
- Trigo R.M., DaCamara C.C., 2000: Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal, *Int. J. Climatol.* 20, 1559-1581.
- Tveito, O.E., 2002: An objective comparison of observed and forecast 24-hour precipitation, a spatial analysis, *Klima*, No 10.
- Tveito O.E. (red.), 2006: COST 719 Final Report, Chapter 2: Spatialisation of the climatological and meteorological information by the support of GIS, Brussels.
- Tveito O.E., Bjordal I., Skjelvag A.O., Aune B., 2005: A GIS-based agro-ecological decision system based on gridded climatology, *Meteorol. Appl.*, 12, 57-68.
- Tveito O.E., Schöner W. (eds.), 2002: Applications of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS), DNMI, *Klima*, No 28, Oslo.
- Tveito O.E., Ustrnul Z., 2003: A review of the use of large-scale atmospheric circulation classification in spatial climatology, DNMI, *Klima*, No 10, Oslo.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2005a: Application of GIS for the development of climatological air temperature maps: an example from Poland, *Meteorol. Appl.*, 12, 43-50.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2005b: Analiza zmienności czasowej rozkładu temperatury powietrza w Polsce z zastosowaniem metod GIS, *Roczniki Geomatyki*, t. 3, z. 2, 153-162.
- Wackernagel, H., 1998: Splines and kriging with drift, Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology, EU Cost79 Publication, Luxembourg, 57-64.

Summary

The main objective of the study is to present spatial and temporal methods in climatology using GIS techniques. The study is mainly based on the examples of climatological elements from the territory of Poland. Simultaneously, many examples from world literature were cited. Special importance of the European Union/European Science Foundation programme COST 719 „The use of GIS in climatology and meteorology” was stressed. First, a review of contemporary studies is presented with explanation of some terms such as ‘interpolation’ and ‘spatialisation’. The principle features of the GIS, digital maps and spatial analyses were discussed.

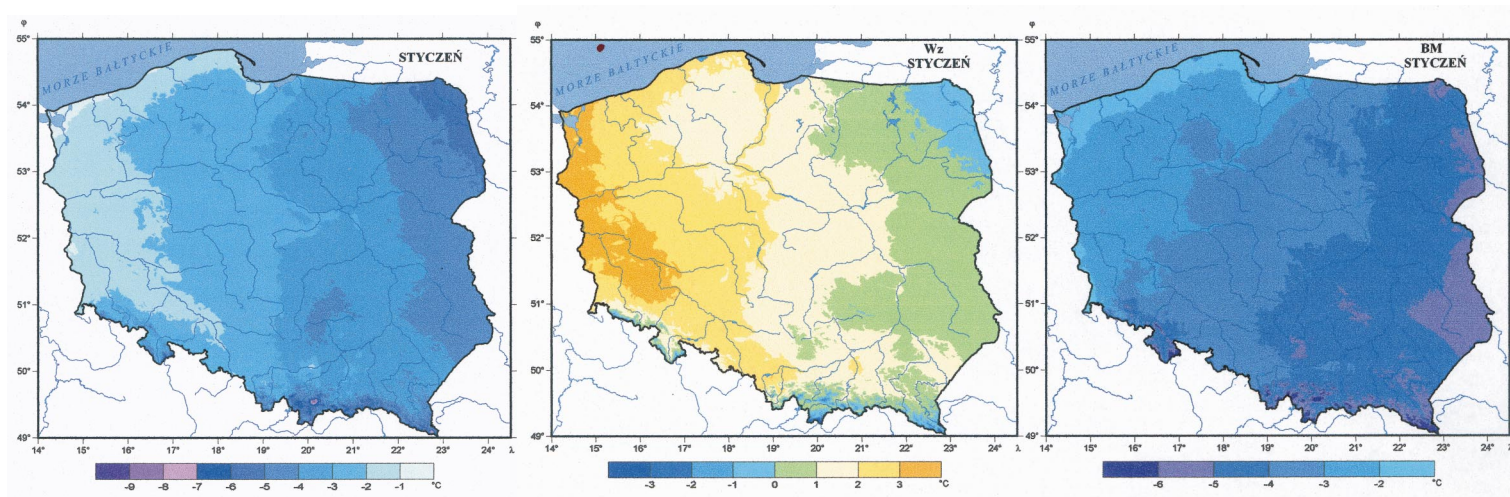
Spatialisation problems were explained on the Polish examples with special attention paid to the air temperature and precipitation. That was done with the reference to some European results. All mentioned studies clearly confirmed that there is no one universal spatialisation method efficient enough for all climatological elements. Moreover, each spatial and temporal scale may require application of other spatialisation method. Usually, the best results can be achieved with the application of methods using additional explanatory variables such as residual kriging, cokriging or multiple regression. Different geographic parameters, including elevation, latitude, longitude, land cover etc. can be used as the predictor variables for the spatialisation. When one can not find them and the coherence between analysing parameter and other variables is unknown application of ordinary kriging is recommended in the first step.

The study confirms that application of circulation types as the main additional predictor (i.e. synoptic climatology method) together with GIS techniques e.g. residual kriging is a useful and promising tool for constructing climate maps at different temporal and spatial scales. The results show that climatological studies with this kind of methodological approach may have a prior cognitive as well as a practical importance. Using the ‘Grosswetterlagen’ calendar of circulation types for this purpose for the territory of Poland has shown that each type causes a slightly different spatial distribution of e.g. air temperature both in winter and summer.

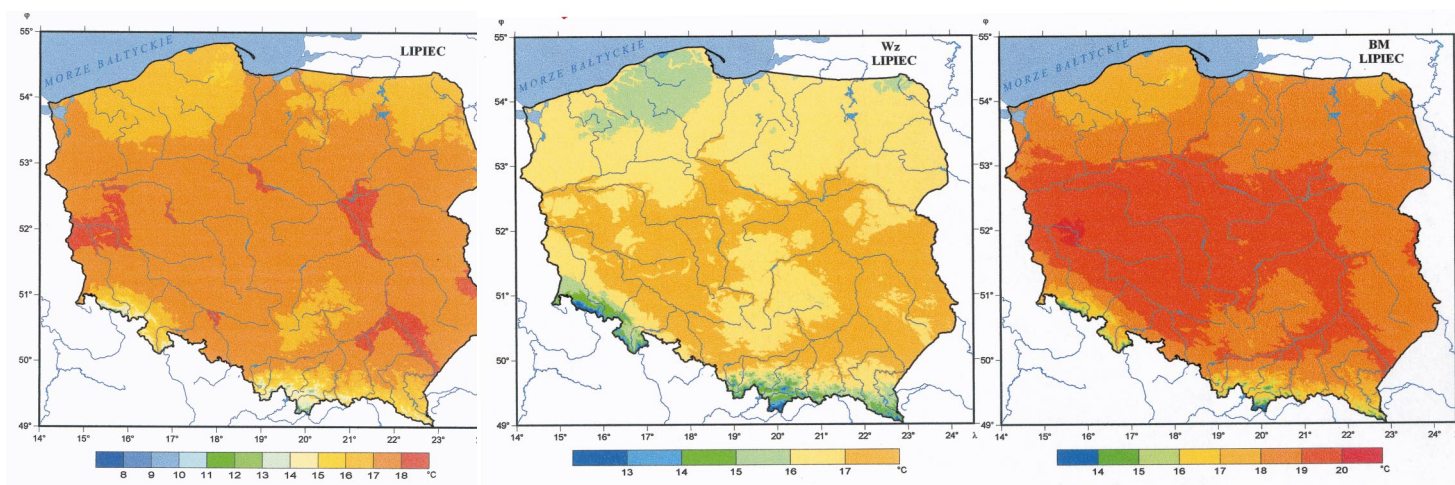
Finally, there are some examples presenting GIS tools for the purposes of temporal analyses. They enable an easy calculation and display of the area with specified climatic conditions and constructing diagrams for the climate monitoring purposes. Gridded approach is strongly recommended as a promising tool for the studies with different spatial and temporal scales.

dr hab. Zbigniew Ustrnul, prof. UŚ
zbigniew.ustrnul@imgw.pl
zustrnul@wnoz.us.edu.pl

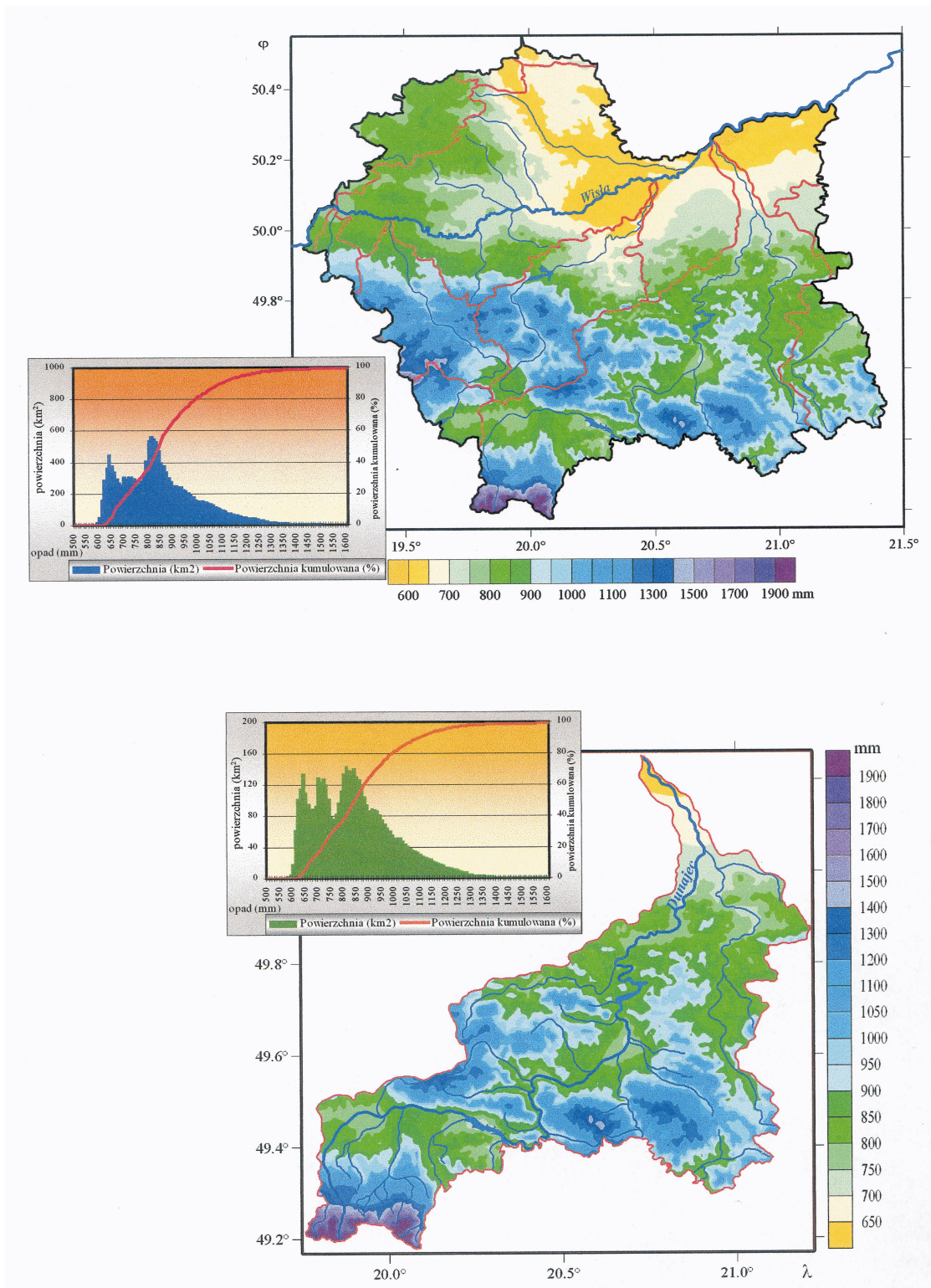
mgr Danuta Czekierda
danuta.czekierda@imgw.pl



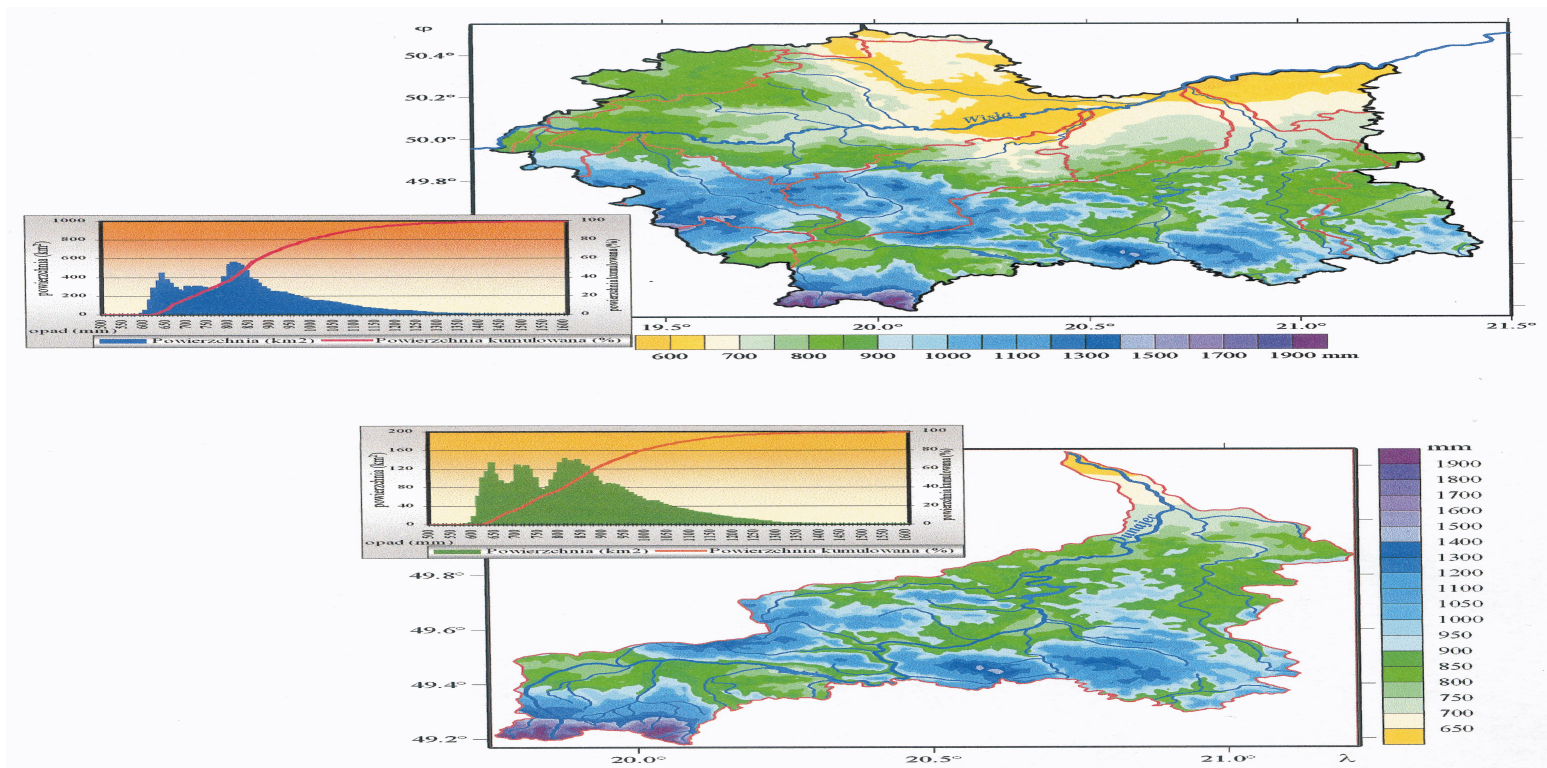
Rys. 3. Rozkłady średniej temperatury powietrza w styczniu oraz średniej dobowej przy typach cyrkulacji Wz i BM (1951–2000)



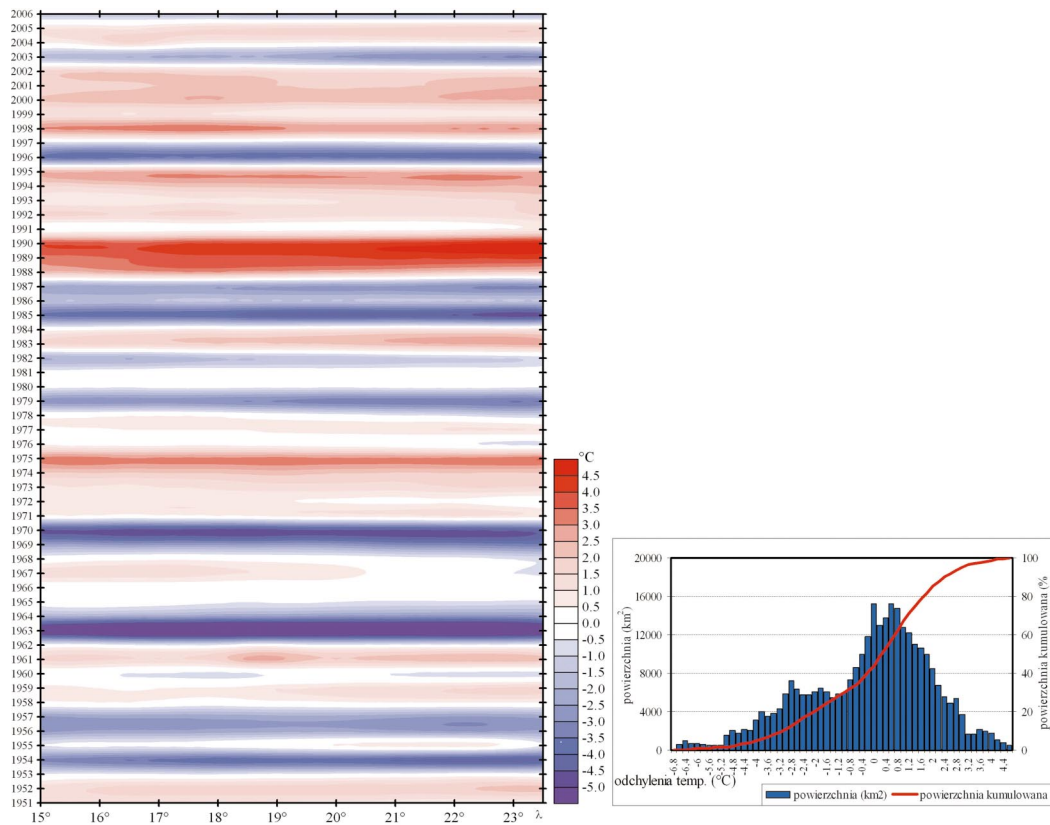
Rys. 4. Rozkłady średniej temperatury powietrza w lipcu oraz średniej dobowej przy typach cyrkulacji Wz i BM (1951–2000)



Rys. 5. Sumy roczne opadów atmosferycznych oraz ich rozkłady powierzchniowe w województwie małopolskim oraz dorzeczu Dunajca (1993-2002)



Rys. 6. Rozkład przestrzenny współczynnika korelacji pomiędzy wskaźnikiem NAO a średnią temperaturą stycznia wyznaczony metodą krigingu (strona lewa) oraz metodą regresji wielokrotnej (strona prawa), 1951-2000



Rys. 7. Rozkład czasowy odchyleń średniej temperatury zimy od wielolecia 1951-2006 na poszczególnych długościach geograficznych w Polsce oraz ich rozkład powierzchniowy