

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 69, 2015: 257–272
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 69, 2015)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 69, 2015: 257–272
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 69, 2015)

Krystyna KONCA-KĘDZIERSKA¹, Małgorzata LISZEWSKA²

¹Institut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute

²Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego
Uniwersytetu Warszawskiego

Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Modelling University
of Warsaw

Zastosowanie metod przepływu optycznego i krytycznego indeksu sukcesu do weryfikacji opadu w symulacjach klimatycznych dla Polski

Application of the optical flow and critical success index methods to verification of precipitation in climate simulations over Poland

Słowa kluczowe: weryfikacja symulacji opadu, wskaźniki klimatyczne, porównywanie pól
Key words: verification of simulation of precipitation, climate indices, comparison of fields.

Wprowadzenie

Znajomość przyszłych charakterystyk klimatycznych regionu jest potrzebna w wielu obszarach życia gospodarczego kraju. Wszystkie plany ekonomiczne powinny uwzględniać przewidywane zmiany klimatu, ponieważ mają one istotny wpływ na rozwój różnych dziedzin przemysłu i rolnictwa. Informacja o spodziewanych tendencjach w rozkła-

dach parametrów klimatycznych pozwala na opracowanie odpowiednich planów adaptacyjnych uwzględniających z jednej strony wykorzystanie zmieniających się warunków pogodowych, a z drugiej uniknięcie skutków ewentualnych katastrof ekologicznych. Zasoby wodne stanowią jeden z ważnych elementów infrastruktury, dlatego informacja dotycząca opadu i jego potencjalnych zmian jest niezwykle istotna. Symulacje klimatyczne opadu są obciążone dużą niepewnością związaną, między innymi, z uproszczeniami opisów procesów fizycznych w modelach czy niewystarczającą rozdzielczością przestrzenną. Konieczna jest ocena jakości symulacji opadu po-

przez porównanie opadu generowanego przez modele z obserwacjami.

Tradycyjne metody weryfikacji pól opadu oparte są na wskaźnikach jakości, dotyczących tablic kontyngencyjnych opisujących wystąpienie lub brak zjawiska czy też przekroczenie lub nie ustalonego prognozy dla sumy opadu. Taki sposób weryfikacji opadu powoduje dużą czułość wyników na niewielkie rozbieżności występowania zjawiska w czasie i przestrzeni, jednocześnie nie stanowiąc wskazówek do analizy źródła powstawania błędów. Współczesny nurt metod weryfikacji pól opadowych w numerycznych prognozach pogody wykacza poza analizy wartości w punkcie. Wykorzystując algorytmy analizy obrazów i sygnałów, stosuje się metody pozwalające na ogólną ocenę przestrzennej zgodności przewidywanych zjawisk. W szczególności są to metody przepływu optycznego i krytycznego indeksu sukcesu (Marzban i Sandgathe, 2008, 2010). Niniejsza praca przedstawia wyniki zastosowania tych metod do weryfikacji opadu w symulacjach klimatycznych.

Dane

Do analizy użyteczności metod przepływu optycznego i krytycznego indeksu

sukcesu do weryfikacji opadu generowanego przez modele klimatyczne wykorzystano wyniki sześciu symulacji regionalnych uzyskanych różnymi modelami w projekcie EU ENSEMBLES (Mitchell i Van Der Linden, 2009). Jest to projekt, który wygenerował i udostępnił ogromną bazę wyników modeli regionalnych i globalnych klimatu, przydatną do rozmaitych badań, między innymi do celów niniejszej pracy. Analizowany okres referencyjny obejmował lata 1971–1990.

Tabela 1 pokazuje zestawienie analizowanych w pracy symulacji; podane są nazwy modeli regionalnych oraz modeli globalnych dostarczających warunki brzegowe do przebiegów.

Symulowane wartości opadu odniesiono do danych obserwacyjnych E-OBS w regularnej siatce geograficznej o rozdzielczości 0.25°. Dobbowe dane E-OBS pochodzą z projektu ECA&D (European Climate Assessment & Dataset). Informacje o ich zakresie i sposobie pozyskiwania danych obserwacyjnych w siatce regularnej można znaleźć w pracy Haylocka (Haylock i in., 2008). Analizy zostały przeprowadzone dla obszaru Polski, obejmującego od 13.125° E do 25.125° E i od 48.875° N do 55.125° N, dla okresu 1971–1990. Dane symulacyjne, dostępne w obróconych siatkach

TABELA 1. Zestawienie analizowanych modeli
TABLE 1. Summary of analyzed models

| Model regionalny / RCM | | Model globalny / GCM | |
|------------------------|--|----------------------|-------------------------|
| Nazwa / Name | Referencje / References | Nazwa / Name | Referencje / References |
| RM5.1 | Colin i in. (2010) | ARPEGE | Bouttier (2010) |
| DMI-HIRHAM5 | Berg i Lucas-Picher 2008, Christensen i in. (2007) | | |
| MPI-M-REMO | Jacob (2001), Jacob i in. (2001) | ECHAM5 | Giorgetta i in. (2006) |
| KNMI-RACMO2 | Meijgaard i in. (2008) | | |
| SMHIRCA | Kjellström i in. (2005) | BCM | Furevik i in. (2003) |

współrzędnych o rozdzielczości 0.22°, zostały interpolowane do regularnej siatki geograficznej E-OBS. Zastosowano funkcje pakietu Ferret (Ferret... 2011), wykorzystujące oprogramowanie do interpolacji sferycznej opracowane w GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). Metoda ta polega na ważonym odległością uśrednianiu wartości w otoczeniu punktu siatki. Z punktu widzenia wielu zastosowań nie jest wymagana szczegółowa analiza dobowych pól parametrów meteorologicznych, ale wiedza na temat ogólnego charakteru zmienności klimatu. Odpowiednim narzędziem do przeprowadzenia takiej analizy są indeksy klimatyczne rekomendowane przez ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices), grupę naukowców powołaną w ramach programu WCRP (World Climate Research Programme). W pracy analizowano indeksy oparte na dobowych sumach opadu (tab. 2) oraz wykorzystano pola tych wskaźników, obliczone dla wybranych symulacji ENSEMBLES i danych obserwacyjnych E-OBS znajdujących się w zasobach Serwisu klimatycznego

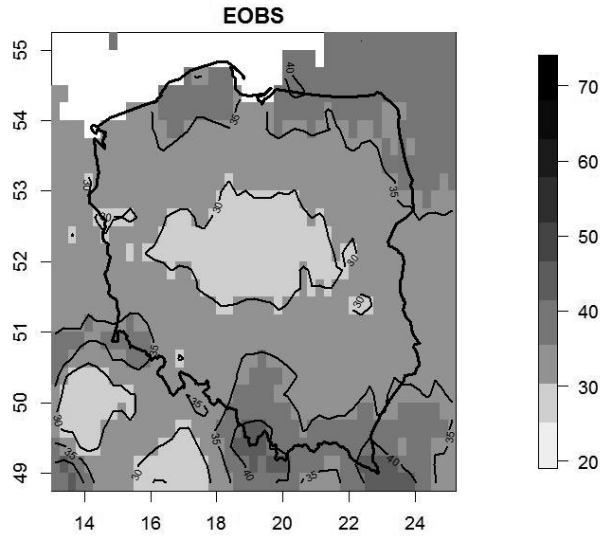
ICM (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego, 2013).

Wybrane indeksy klimatyczne charakteryzują intensywność i długotrwałość opadu w rozważanym okresie referencyjnym 1971–1990. Porównano pola indeksów obliczonych na podstawie danych E-OBS oraz sześciu wybranych regionalnych symulacji klimatycznych. Rysunki 1 i 2 pokazują przykładowe mapy udziału procentowego dni z opadem ≥ 1 mm na dobę w okresie 1971–1990, odpowiednio dla danych obserwacyjnych E-OBS oraz dla wszystkich uwzględnianych w analizie symulacji.

Subiektywna ocena podobieństwa prezentowanych rozkładów przestrzennych wskazuje na mapy dla symulacji DMI_HIRHAM5_ARPEGE i KNMI-RACMO2-ECHAM5-r3 jako najbliższe do danych obserwacyjnych E-OBS. Obliczono współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy polem udziału procentowego dni z opadem dla danych obserwacyjnych E-OBS i analizowanych symulacji klimatycznych. Maksymalną korelację osiągnięto dla dwóch wymienionych wyżej symulacji i wyniosła ona odpowiednio

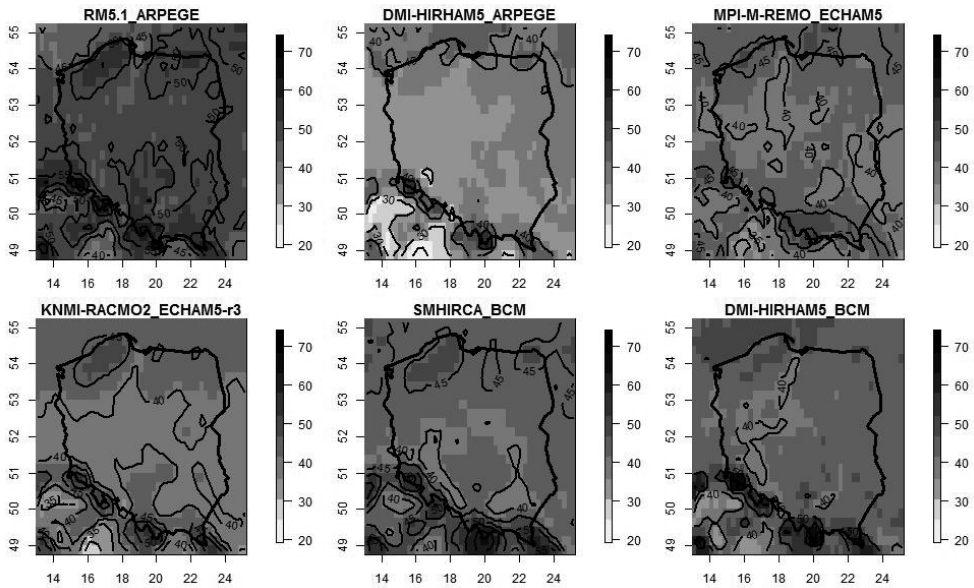
TABELA 2. Opadowe wskaźniki klimatyczne
TABLE 2. Climate indices based on precipitation

| |
|--|
| Definicja wskaźnika / Definition of index |
| Najdłuższy okres z opadem < 1 mm na dobę (maksymalny okres suchy) |
| Liczba okresów z opadem < 1 mm na dobę dłuższych od 5 dni (liczba okresów suchych dłuższych niż 5 dni) |
| Najdłuższy okres z opadem ≥ 1 mm na dobę (maksymalny okres mokry) |
| Procentowy udział dni z opadem ≥ 1 mm na dobę (procent dni mokrych) |
| Maksymalna dobowo suma opadów |
| Maksymalna 5-dniowa suma opadów |
| Liczba dni z opadem ≥ 10 mm na dobę (liczba dni z wysokim opadem) |
| Liczba dni z opadem ≥ 20 mm na dobę (liczba dni z bardzo wysokim opadem) |



RYSUNEK 1. Udział procentowy dni z opadem ≥ 1 mm na dobę dla danych obserwacyjnych E-OBS w okresie 1971–1990

FIGURE 1. Percentage of wet days ≥ 1 mm on day for the E-OBS data in 1971–1990



RYSUNEK 2. Udział procentowy dni z opadem ≥ 1 mm na dobę w okresie 1971–1990 dla wybranych symulacji

FIGURE 2. Percentage of wet days ≥ 1 mm on day in 1971–1990 for selected simulations

0,7 dla DMI_HIRHAM5_ARPEGE i 0,73 dla KNMI-RACMO2-ECHAM5-r3. Wartość tego współczynnika korelacji potwierdza wynik subiektywnej oceny pól udziału procentowego dni z opadem. Zaobserwowana w przypadku modeli DMI_HIRHAM5_ARPEGE i KNMI-RACMO2-ECHAM5-r3 stosunkowo wysoka korelacja z polem dla danych obserwacyjnych E-OBS wynika głównie z dobrego odtworzenia przez te modele strefy małych wartości udziału procentowego dni z opadem w środkowej części Polski. Jednak inaczej rozkłada się pozostała część tej strefy, dla modelu KNMI-RACMO2-ECHAM5-r3 rozciąga się ona na część wschodnią Polski, a dla modelu DMI_HIRHAM5_ARPEGE bardziej na zachód. Ten fakt utrudnia wnioskowanie, która z map udziału procentowego dni z opadem jest bardziej zbliżona do mapy dla danych obserwacyjnych. Rozwiązanie tego typu zagadnień dają metody analizy porównawczej obrazów, stosowane między innymi przy weryfikacji numerycznych prognoz pogody.

Metoda

Przy porównywaniu rozkładów przestrzennych często bardziej istotna jest ocena ogólnej charakterystyki pola analizowanego parametru niż różnice wartości w węzłach siatki. W numerycznych prognozach opadu często dla celów ewaluacji modelu ważniejsze jest określenie, czy model przewidział wystąpienie opadu w pewnym regionie niż w konkretnych punktach siatki. Ocena prognozy opadu na podstawie różnic pomiędzy wartościami w punktach siatki może prowadzić do niepoprawnej inter-

pretacji otrzymanych wyników i przeszacowania liczby punktów, dla których prognoza jest oceniana jako błędna. Dlatego celowe jest uwzględnianie własności parametru w otoczeniu punktu. W pracy Gilleland i in. (2010) przedstawiono propozycję metod pozwalających na ogólną ocenę przestrzennej zgodności przewidywanych zjawisk opadowych, które można podzielić na cztery kategorie: separowania skal, analizowania otoczenia punktu, porównywania struktur przestrzennych i transformowania pól.

Wieloletnie charakterystyki opadu znacznie lepiej opisują wskaźniki klimatyczne niż uśrednione pola sum dobowych. Pozwala to na znacznie ogólniejszy obraz rozkładu przestrzennego zjawiska przydatny przy analizie wpływu opadu na środowisko.

Do porównywania map wskaźników klimatycznych wybrano dwie metody: metodę przepływu optycznego należącą do kategorii metod opartych na transformowaniu pól i metodę krytycznego indeksu sukcesu wykorzystującą analizę struktur przestrzennych w polach parametrów meteorologicznych.

Pierwsza z wybranych metod nazywana jest metodą przepływu optycznego (OF – Optical Flow) i jej zastosowanie do weryfikacji pól numerycznych prognoz pogody opisane jest w pracy Marzban i Sandgathe (2010). Główna idea tej metody polega na znalezieniu przekształcenia lokalnie przeprowadzającego jedno pole na drugie. Metoda OF pozwala ocenić podobieństwo przestrzennej struktury analizowanych pól. W metodzie tej zakłada się, że pola są na tyle podobne do siebie, że możliwe jest znalezienie lokalnie liniowego przekształcenia. Obliczanie parametrów

przekształcenia transformującego pola odbywa się w najbliższym otoczeniu danego punktu siatki, dlatego można założyć, że w tym obszarze wartości są dostatecznie bliskie sobie. Porównanie różnic pomiędzy polami sprowadza się do analizy wielkości charakteryzujących znalezione metodą najmniejszych kwadratów lokalne przekształcenie jednej mapy w drugą. W każdym punkcie siatki to przekształcenie jest złożeniem dwóch przekształceń: zmiany wartości pola w punkcie (amplituda) i przesunięcia mapy o zadany wektor (kierunek i długość wektora przesunięcia). W pracy analizowano pola wartości i wartości bezwzględnej amplitud przekształcenia OF dla map wartości indeksów klimatycznych wymienionych w tabeli 2.

Druga z metod, opisana w pracy Marzban i Sandgathe (2008), porównuje przestrzenny rozkład pól przez zastosowanie techniki analizy skupień do pola będącego ich sumą algebraiczną. Przeprowadzenie porównania wymaga określenia progu dla wartości pól tak, że w efekcie analizie skupień poddawana jest informacja o przekroczeniu tego progu w węzłach siatki. Analiza przeprowadzana jest wielokrotnie dla kolejno zadawanej liczby klastrów, która może być interpretowana jako rozdzielczość kolejnego kroku metody. Pola przekroczeń przyjętego progu wartości (badanego indeksu klimatycznego) dla danych obserwacyjnych i symulacji klimatu łączone są w jedno pole z zachowaniem informacji, z którego pola wyjściowego dany punkt pochodzi. Następnie dla przyjętej liczby klastrów (K) przeprowadzana jest analiza skupień, w której efekcie otrzymuje się opis w postaci K obiektów składających się z punktów podchodzących

z obu pól wejściowych. Na podstawie stosunku liczby punktów z pola obserwacji do całkowitej liczby punktów w danym obiekcie (klastrze) można go zakwalifikować jako zdarzenie trafnie lub błędnie symulowane. Na tej podstawie dla każdego podziału na K klastrów, oznaczając przez n_t liczbę klastrów zakwalifikowanych jako trafnie modelowane, a przez n_f liczbę klastrów zakwalifikowanych jako modelowane nieprawidłowo, można obliczyć krytyczny indeks sukcesu (CSI – Critical Success Index):

$$CSI_K = 1 - \frac{n_f}{n_f + n_t}$$

Otrzymane dla różnych rozdzielczości K wartości CSI_K pozwalają na ocenę stopnia dopasowania pól modelowanych do pola obserwacji, im wyższy CSI_K , tym dane symulowane są bliższe obserwowanym. Przy dostatecznie dużych K wartości CSI_K ustalają się na poziomie charakterystycznym dla danego modelu.

Powyższe dwie metody OF i CSI zastosowano do porównania map wskaźników klimatycznych dotyczących opadu. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano pakiet statystyczny SpatialVx w Systemie R (R Development Core Team, 2011). Pakiet zawiera szereg metod stosowanych w przestrzennej weryfikacji numerycznych prognoz pogody.

Wyniki

Zastosowanie wymienionych w poprzednim rozdziale metod analizy wyników pozwala na weryfikację poszczególnych symulacji opadu. W metodzie OF oceniano pola amplitud przekształcenia

transformującego dane modelowe na dane obserwacyjne E-OBS. Dla każdego punktu siatki o indeksach (i, j) w otoczeniu 9-punktowym znajdowano metodą najmniejszych kwadratów wartości charakteryzujące lokalnie przekształcenie transformujące, to znaczy zmiany wartości pola Δ_{ij} , jego przesunięcie i kierunek tego przesunięcia. Otrzymane w ten sposób pole zmian wartości Δ_{ij} opisuje różnicowanie map indeksów klimatycznych dla modeli w stosunku do danych obserwacyjnych. Dla ogólnego porównywania

tych pól dla różnych symulacji posłużono się wartościami średnimi w domenie Δ_{SR} i medianą Δ_{MED} , czyli taką wartością że przynajmniej na połowie obszaru domeny $\Delta_{ij} < \Delta_{MED}$. Analogiczne wartości zostały wyliczone również dla pól wartości bezwzględnej różnic $|\Delta|_{ij}$. Otrzymane wyniki dla wszystkich analizowanych indeksów klimatycznych zostały zestawione w tabeli 3. Dla porównania w tej tabeli zostały również umieszczone wartości średnie obszarowe odpowiedniego indeksu klimatycznego.

TABELA 3. Charakterystyki pola amplitud w metodzie OF dla kolejnych indeksów klimatycznych
TABLE 3. Characteristics of amplitude fields of the OF method, for consecutive climate indices

A. Maksymalny okres suchy

A. The largest dry period

| Model | Średnia Average [dni] | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 44 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 37 | -7,6 | -8,5 | 7,6 | 8,8 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 53 | 7,9 | 7,7 | 7,9 | 8,5 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 34 | -10,6 | -11,3 | 10,6 | 11,3 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 31 | -16,4 | -16,0 | 16,4 | 16,3 |
| SMHIRCA_BCM | 31 | -14,6 | -15,2 | 14,6 | 15,2 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 24 | -21,3 | -22,1 | 21,3 | 22,1 |

B. Liczba okresów suchych dłuższych niż 5 dni

B. The number of dry periods of more than 5 days

| Model | Średnia Average | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 278 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 175 | -112,4 | -106,6 | 112,4 | 106,6 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 254 | -25,4 | -25,4 | 25,4 | 25,5 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 213 | -72,1 | -68,3 | 72,1 | 68,3 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 225 | -58,4 | -54,1 | 58,4 | 54,1 |
| SMHIRCA_BCM | 187 | -96,5 | -93,4 | 96,5 | 93,4 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 181 | -100,9 | -101,4 | 100,9 | 101,4 |

C. Maksymalny okres mokry

C. The largest wet period

| Model | Średnia Average [dni] | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|-----------------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 14 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 32 | 18,1 | 18,7 | 18,1 | 18,7 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 17 | 3,1 | 3,0 | 3,1 | 3,4 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 16 | 1,6 | 1,7 | 2,0 | 2,4 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 16 | 3,0 | 2,7 | 3,2 | 3,2 |
| SMHIRCA_BCM | 17 | 3,1 | 3,0 | 3,2 | 3,5 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 18 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,5 |

D. Procent dni mokrych

D. Percentage of wet days

| Model | Średnia Average [%] | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|---------------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 33,4 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 49,6 | 17,6 | 17,2 | 17,6 | 17,2 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 35,3 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,5 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 41,3 | 9,1 | 8,7 | 9,1 | 8,7 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 40,6 | 8,3 | 7,8 | 8,3 | 7,8 |
| SMHIRCA_BCM | 44,1 | 11,2 | 11,4 | 11,2 | 11,4 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 44,3 | 11,5 | 11,7 | 11,5 | 11,7 |

E. Maksymalna dobową sumą opadów

E. Highest one day precipitation amount

| Model | Średnia Average [mm] | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 50,2 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 54,7 | 8,2 | 3,6 | 13,4 | 15,4 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 55,5 | 9,5 | 5,6 | 12,6 | 14,9 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 71,9 | 23,6 | 18,3 | 26,6 | 25,7 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 63,8 | 15,6 | 12,4 | 17,4 | 18,6 |
| SMHIRCA_BCM | 71,3 | 27,0 | 20,1 | 28,6 | 26,1 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 53,3 | 6,5 | 2,4 | 9,4 | 12,3 |

F. Maksymalna 5-dniowa suma opadów

F. Highest five-day precipitation amount

| Model | Średnia Average [mm] | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|----------------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 101,3 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 98,5 | -1,1 | -3,7 | 15,2 | 17,2 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 100,9 | 0,2 | 0,2 | 13,5 | 16,8 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 113,2 | 12,1 | 9,2 | 22,9 | 25,9 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 106,3 | 7,1 | 5,3 | 14,4 | 17,0 |
| SMHIRCA_BCM | 136,5 | 26,6 | 29,7 | 27,7 | 34,7 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 93,9 | -6,4 | -8,5 | 12,3 | 15,8 |

G. Liczba dni z wysokim opadem

G. Numbers of days with heavy precipitation

| Model | Średnia Average | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 219 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 271 | 58,9 | 52,1 | 58,9 | 54,4 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 282 | 55,2 | 55,8 | 55,5 | 59,3 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 302 | 92,4 | 88,3 | 92,4 | 90,1 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 310 | 86,1 | 84,2 | 86,1 | 85,7 |
| SMHIRCA_BCM | 342 | 117,2 | 119,2 | 117,2 | 119,2 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 334 | 112,8 | 112,7 | 112,8 | 112,7 |

H. Liczba dni z bardzo wysokim opadem

H. Numbers of days with very heavy precipitation

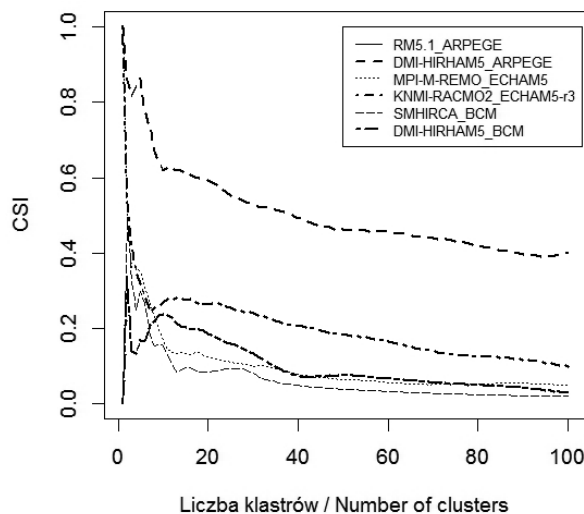
| Model | Średnia Average | Δ_{MED} | Δ_{SR} | $ \Delta _{MED}$ | $ \Delta _{SR}$ |
|-----------------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| E-OBS | 35 | | | | |
| RM5.1_ARPEGE | 50 | 12,2 | 13,8 | 12,3 | 14,5 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 49 | 12,5 | 12,1 | 12,5 | 12,7 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 49 | 16,7 | 14,2 | 17,3 | 16,4 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 54 | 18,9 | 17,8 | 18,9 | 18,5 |
| SMHIRCA_BCM | 78 | 38,1 | 40,3 | 38,1 | 40,3 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 55 | 14,5 | 17,1 | 14,5 | 17,3 |

Dla każdego indeksu klimatycznego wiersze w tabeli dla dwóch symulacji, dla których wyniki wskazują najmniejsze odstępstwo od danych obserwacyjnych E-OBS, zostały wyróżnione. Poza przypadkiem indeksu opisującego długość maksymalnego okresu mokrego wśród wybranych par znajduje się symulacja DMI-HIRHAM5_ARPEGE. Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli można zauważyć również, że średnie obszarowe liczby dni z wysokim i bardzo wysokim opadem (powyżej 10 mm i 20 mm) są większe w danych dla klimatu odtworzonego. Największe wartości średnich obszarowych liczby dni z wysokimi opadami zanotowano dla symulacji SMHIRCA_BCM. W przypadku opadu powyżej 20 mm średnia obszarowa liczby dni jest ponad dwukrotnie większa dla tego modelu niż dla danych obserwacyjnych E-OBS. Ponadto na połowie obszaru liczba dni z tak wysokimi opadami również jest dwukrotnie większa dla symulacji SMHIRCA_BCM. Wszystkie modele wykazują również większą średnią obszarową maksymalnego opadu dobowego. Dla trzech symulacji: MPI-M-REMO_ECHAM5, KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 i SMHIRCA_BCM, średnia obszarowa maksymalnej dobowej sumy opadu o ponad 20% przekracza analogiczny wskaźnik dla danych obserwacyjnych E-OBS. Dla modelu SMHIRCA_BCM na połowie obszaru błąd względny w stosunku do danych E-OBS przekracza 50%. W przypadku maksymalnej 5-dobowej sumy opadu tylko dla połowy symulacji średnia obszarowa jest większa niż dla danych obserwacyjnych E-OBS. Najbardziej zbliżony rozkład otrzymano dla symulacji DMI-HIRHAM5_BCM, dla której średnia

obszarowa różni się jedynie o 0,4 mm w stosunku do średniej dla E-OBS, a na połowie obszaru błąd bezwzględny oszacowany na podstawie metody OF jest poniżej 13,5 mm. Symulacja SMHIRCA_BCM ma średnią obszarową 5-dniowej sumy opadów większą o 35 mm niż dane E-OBS, a oszacowany błąd bezwzględny dla połowy punktów siatki jest większy niż 27 mm. Dla modeli większy jest również procentowy udział dni mokrych, a dla połowy symulacji różnica w stosunku do obserwacji przekracza 10%. Najwięcej dni mokrych zaobserwowano dla symulacji RM5.1_ARPEGE, dla której oszacowany metodą OF błąd dla połowy punktów siatki przekracza 17%. Średnia obszarowa maksymalnej długości okresów mokrych też jest większa dla klimatu odtworzonego przez modele niż dla klimatu obserwowanego. Indeksy klimatyczne opisujące występowanie okresów suchych, to znaczy długość okresu i liczba okresów, poza jednym przypadkiem (długości okresu suchego dla symulacji DMI-HIRHAM5_ARPEGE), mają średnie obszarowe mniejsze dla modeli niż dla danych EOBS. Najbardziej zaniżoną wartość długości okresu suchego otrzymano dla symulacji DMI-HIRHAM5_BCM, średnia obszarowa jest mniejsza od średniej dla danych E-OBS o prawie 50% (20 dni), a wartości tego indeksu w ponad połowie punktów siatki są również mniejsze średnio o 21 dni. Na podstawie powyższych wyników można wnioskować, że opady symulowane są intensywniejsze i trwają dłużej, natomiast okresy bezdeszczowe są niedoszacowane zarówno pod względem liczby ich wystąpień, jak i długości trwania.

Druga z zastosowanych metod ocenia, w jakim stopniu opis przestrzenny opadu dokonany za pomocą indeksów klimatycznych dla klimatu odtworzonego modelami regionalnymi jest podobny do analogicznego opisu uzyskanego dla danych obserwacyjnych E-OBS. Mapy indeksów klimatycznych są przetworzone do pól zero-jedynkowych, gdzie 0 oznacza brak przekroczenia wartości progowej, 1 zaś – jej przekroczenie. Obliczenia zostały wykonane dla dwóch wartości progowych (W_THR) minimum ($MIN_{E OBS}$) oraz mediany ($MED_{E OBS}$) pola indeksów klimatycznych danych obserwacyjnych E-OBS. Wybrane wartości progowe dla indeksów klimatycznych muszą spełniać warunek występowania w obu porównywanych polach punktów, w których te wartości są przekraczane, dwie podstawowe charakterystyki dla pól danych obserwacyjnych spełniają ten warunek. Połączone pole

przekroczeń przyjętej wartości progowej analizowanego indeksu klimatycznego przez dane obserwacyjne i symulacje poddawane zostały klastrowaniu dla zadawanej liczby klastrów w zakresie od 1 do 100. Dla każdej liczby klastrów, która stanowi rozdzielczość prowadzonej analizy, obliczony został wskaźnik *CSI*, a następnie średnia wartość tego wskaźnika dla klastrów danego podziału. Sporządzone wykresy zależności średniej wartości wskaźnika *CSI* od rozdzielczości – liczby klastrów pozwalają ocenić stopień dopasowania danych modelowych i obserwacyjnych. Wraz ze wzrostem rozdzielczości analizy wartość średnia *CSI* ustala się na odpowiednim poziomie dla każdej z symulacji regionalnych. Przykład wykresów *CSI* w zależności od liczby klastrów dla długości okresu suchego przedstawiono na rysunku 3.



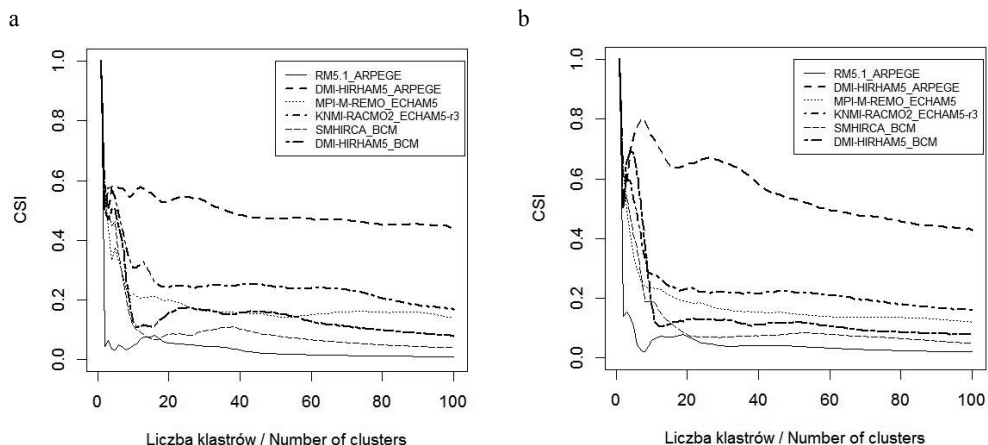
RYSUNEK 3. Zależność wskaźnika *CSI* od liczby klastrów dla liczby okresów suchych dłuższych niż 5 dni

FIGURE 3. Dependence of the *CSI* index upon a number of clusters for the number of dry periods of more than 5 days

W przypadku liczby okresów suchych dłuższych niż 5 dni możliwe było przeprowadzenie obliczeń tylko dla wartości progowej równej minimum tego parametru dla danych obserwacyjnych ($W_THR = MIN_{EOBS}$). Wszystkie symulacje poza DMI-HIRHAM5_ARPEGE zaniżyły znacznie liczbę okresów suchych. Wartość współczynnika CSI dla tego modelu ustaliła się na poziomie 0,4, podczas gdy dla pozostałych modeli jest poniżej 0,2. Dla długości okresów bezopadowych również model DMI-HIRHAM5_ARPEGE wykazał najlepsze dopasowanie do danych E-OBS. Przy wartości progowej $W_THR = MIN_{EOBS}$ wskaźnik CSI ustabilizował się na poziomie 0,5, a dla wartości progowej $W_THR = MED_{EOBS}$ na poziomie 0,3. Ponadto w przypadku modeli MPI-M-REMO_ECHAM5, SMHIRCA_BCM i DMI-HIRHAM5_BCM przeprowadzenie analizy dla $W_THR = MED_{EOBS}$ okazało się niemożliwe, ponieważ wartości maksymalne pola wskaźnika długości okresów suchych dla tych modeli są na

poziomie MED_{EOBS} . Dla maksymalnej długości okresu mokrego dla wszystkich modeli poza RM5.1_ARPEGE wartości wskaźnika CSI ustaliły się na poziomie bliskim 0,5. Dla symulacji DMI-HIRHAM5_ARPEGE osiągnięta wartość CSI była największa ($W_THR = MIN_{EOBS}$) lub druga w kolejności ($W_THR = MED_{EOBS}$). Ten sam model wykazał również wyraźnie lepsze dopasowanie wskaźnika CSI dla procentu liczby dni mokrych. Dla obu przypadków wartości progowych ustalona wartość CSI jest powyżej 0,4, podczas gdy analogiczne wartości dla pozostałych modeli nie przekraczają 0,2. Wyniki analizy CSI dla procentu liczby dni mokrych przedstawiono na rysunku 4, wykresy po lewej stronie dotyczą przypadku $W_THR = MIN_{EOBS}$, a po prawej stronie $W_THR = MED_{EOBS}$.

Analiza CSI dla indeksów opisujących maksymalne opady jedno- i pięciodniowe wykazała, że dla większości symulacji przy obu wartościach progowych ustalona wartość wskaźnika CSI



RYSUNEK 4. Wykresy zależności wskaźnika CSI dla procentu liczby dni mokrych: a – $W_THR = MED_{EOBS}$, b – $W_THR = MIN_{EOBS}$

FIGURE 4. CSI graphs for the percentage of wet days: a – $W_THR = MED_{EOBS}$, b – $W_THR = MIN_{EOBS}$

dla dużej liczby klastrów (około 100) mieści się w granicach od 0,5 do 0,7. Najmniejsza wartość ustalonego *CSI* (około 0,4) we wszystkich badanych przypadkach występuje dla symulacji SMHIRCA_BCM. Wartości wskaźnika *CSI* dla dużej liczby klastrów dla modelu DMI-HIRHAM5_ARPEGE były największe lub drugie w kolejności. Wskaźnik *CSI* dla liczby dni z wysokim opadem pozwala podzielić symulacje na dwie grupy. Dla pierwszej grupy symulacji wskaźnik ten ustala się na poziomie 0,6, dla drugiej grupy wskaźnik *CSI* dla tego indeksu ustala się na poziomie 0,4. Dla wartości progowej $W_THR = MIN_{E-OBS}$ do pierwszej grupy należą symulacje RM5.1_ARPEGE i DMI-HIRHAM5_ARPEGE. W przypadku wartości progowej $W_THR = MED_{E-OBS}$ do grupy o większych wartościach ustalonego wskaźnika *CSI* dołącza również symulacja DMI_HIRHAM5_BCM. W ocenie za pomocą wskaźnika *CSI* dla indeksu klimatycznego opisującego częstość występowania bardzo wysokich opadów symulacja DMI-HIRHAM5_ARPEGE okazała się najodpowiedniejsza. Dla

pozostałych symulacji (poza DMI-HIRHAM5_BCM) mediana pola liczby dni z bardzo wysokim opadem jest zawyżona w stosunku do tej dla danych E-OBS o ponad 50%. Ten fakt powoduje, że wartość ustalonego dla dużej liczby klastrów wskaźnika *CSI* spada nawet do poziomu 0,2. Przeprowadzona analiza pól indeksów klimatycznych wskazuje na model DMI-HIRHAM5_ARPEGE jako najwierniej odtwarzający analogiczne pola obserwowane.

Na przykładzie indeksu określającego liczbę dni z opadem powyżej 20 mm przeprowadzono analizę porównawczą współczynnika korelacji pomiędzy polami indeksu a wartościami miar określonych w metodach *CSI* i OF. Jako punkt odniesienia przyjęto procent powierzchni domeny, w której wartości indeksu dla symulacji i obserwacji różnią się mniej niż 10 (mniej niż połowa rozstępu kwartylowego dla pola analizowanego indeksu dla danych obserwacyjnych). Tabela 4 zawiera zestawienie miar dopasowania symulacji do danych obserwacyjnych E-OBS opartych na tym indeksie. Poza wartościami w ostatniej kolumnie tabeli,

TABELA 4. Porównanie wskaźników dopasowania dla liczby dni z opadem powyżej 20 mm
TABLE 4. Comparison of fitting indices for the number of days with precipitation above 20 mm

| Model | Współczynnik korelacji | Procent obszaru (liczby punktów siatki), gdzie różnice liczby dni z bardzo wysokimi opadami nie przekraczają 10 | Wartość <i>CSI</i> dla minimum E-OBS | Wartość <i>CSI</i> dla mediany E-OBS | Średnia obszarowa wielkość błędu OF |
|-----------------------|------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| RM5.1_ARPEGE | 0,82 | 35 | 0,46 | 0,55 | 14 |
| DMI-HIRHAM5_ARPEGE | 0,75 | 41 | 0,63 | 0,62 | 12 |
| MPI-M-REMO_ECHAM5 | 0,60 | 22 | 0,42 | 0,48 | 14 |
| KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 | 0,81 | 20 | 0,37 | 0,47 | 18 |
| SMHIRCA_BCM | 0,77 | 7 | 0,27 | 0,29 | 40 |
| DMI-HIRHAM5_BCM | 0,71 | 36 | 0,59 | 0,53 | 17 |

gdzie umieszczono średnią obszarową wielkości błędu w metodzie OF, większa wartość w danej kolumnie tabeli wskazuje na lepszą zgodność symulacji z danymi obserwacyjnymi.

Jeśli by przy ocenie map liczby dni z bardzo wysokimi opadami posługiwać się współczynnikiem korelacji, to w gronie trzech najlepszych symulacji znalazłby się model SMHIRCA_BCM (duża wartość współczynnika korelacji 0,77). Według omawianych w pracy metod ta symulacja wypadła najgorzej i, jak sprawdzono, obszar, na którym różnica pomiędzy symulowaną liczbą dni z bardzo wysokim opadem a obserwowaną liczbą dni nie przekracza 10, wynosi tylko 7% powierzchni. Dla liderów wskazanych przez metody OF i CSI ten procent waha się w granicach 35–41%.

Podsumowanie i wnioski

Pola wartości wybranych indeksów klimatycznych opartych na dobowej sumie opadu stanowią ogólny opis warunków opadowych w danym regionie. Zastosowanie opisanych w pracy metod porównywania map indeksów klimatycznych daje możliwość określenia miar stopnia zgodności danych modelowych i danych obserwacyjnych. W przypadku metody przepływu optycznego OF miarą tą jest parametr określający wielkość amplitudy lokalnej transformacji pól. W drugiej metodzie wartość krytycznego indeksu sukcesu (CSI) ocenia zgodność przestrzennego rozkładu wskaźnika przekroczenia ustalonej wartości progowej indeksu klimatycznego. CSI obliczony dla połączonych pól modelowego i obserwacyjnego oraz dostatecznie

dużej liczby klastrów można przyjąć za miarę podobieństwa rozkładów danego indeksu klimatycznego.

Przeprowadzona analiza na grupie sześciu symulacji regionalnych z wykorzystaniem ośmiu indeksów klimatycznych pozwoliła na ocenę jakości odtworzenia przez symulacje ogólnego opisu opadu. Indeksy opisujące sytuacje bezopadowe (gdy suma opadu dobowego jest mniejsza niż 1 mm) wykazują większą rozbieżność w stosunku do wartości dla danych obserwacyjnych E-OBS. Długotrwałość zjawiska i liczba wystąpień takich sytuacji jest niedoszacowywana przez symulacje, o czym świadczy średnia obszarowa wielkość błędu w metodzie OF, która jest w większości przypadków ujemna. Dla indeksów opisujących wystąpienie opadu sytuacja jest przeciwna, z ich wartości wynika, że opady symulowane są intensywniejsze i trwają dłużej. Strefy wysokich opadów zarówno pod względem ich wielkości, jak i częstości występowania zostały poprawnie zlokalizowane przy południowej granicy Polski (obszar górzysty) w przypadku wszystkich analizowanych symulacji. Analiza różnic pomiędzy symulacjami w stosunku do różnicy wartości indeksów klimatycznych dla symulacji i danych obserwacyjnych E-OBS wykazała, że w większości przypadków symulacje różnią się bardziej pomiędzy sobą niż z danymi obserwacyjnymi. Dla modelu DMI-HIRHAM5_ARPEGE wniosek taki dotyczy wszystkich analizowanych indeksów klimatycznych.

Praca stanowi kontynuację badań prowadzonych w ramach projektu KLIMAT „Wpływ zmian klimatu na społeczeństwo, środowisko i gospodarkę”

nr POIG.01.03.01-14-011/08 w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Literatura

- Berg, P. i Lucas-Picher, P. (2008). *Implementation of spectral nudging in the HIRHAM5 Regional Climate Model*. Pobrano z lokalizacji Danish Meteorological Institute: <http://www.dmi.dk/fileadmin/rapporter/dkc/dkc08-08.pdf>
- Bouttier, F. (2010). *The Météo-France NWP system: description, recent changes and plans*. Pobrano z lokalizacji Centre National de Recherches Météorologiques: <http://www.cnrmm.meteo.fr/gmap/nwp/nwpreport.pdf>
- Christensen, O.B., Drews, M., Christensen, J.H., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I. i Rinke, A. (2007). *The HIRHAM Regional Climate Model Version 5 (beta)*. Pobrano z lokalizacji Danish Meteorological Institute: <http://www.dmi.dk/fileadmin/rapporter/tr/tr06-17.pdf>
- Colin, J., Deque, M., Radu, R. i Somot, S. (2010). Sensitivity study of heavy precipitation in Limited Area Model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus*, 62A, 591–604.
- Ferret, NOAA/OAR/PMEL Pacific Marine Environmental Laboratory (2011). *Ferret, Data Visualization and Analysis*. Pobrano z lokalizacji: <http://ferret.pmel.noaa.gov/ferret>
- Furevik, T., Bentsen, C.M., Drange, C.H., Kindem, I.K., Kvamstr, T.Ć.N. i Sorteberg, G.Ć. A. (2003). Description and evaluation of the bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM. *Climate Dynamics*, 21, 27–51. doi:10.1007/s00382-003-0317-5
- Gilleland, E., Ahijevych, D.A., Brown, B.G. i Ebert, E.E. (2010). Verifying Forecasts Spatially. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 91, 1365–1373. doi:10.1175/2010BAMS2819.1.
- Giorgetta, M.A., Brasseur, G.P., Roeckner, E. i Jochem Marotzke, J. (2006). Preface to Special Section on Climate Models at the Max Planck Institute for Meteorology. *Journal of Climate*, 19(16), 3769–3770.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. i New, M.R. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113,D20119, 1–12.
- Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego. (2013). *Serwis klimatyczny – Zmieniający się klimat w Polsce*. Pobrano z lokalizacji ICM: http://klimat.icm.edu.pl/serv_climate.php
- Jacob, D. (2001). A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77, 1–4, 61–73.
- Jacob, D., Andrae, U., Elgered, G., Fortelius, C., Graham, L.P., Jackson, S.D., ... Yang, X. (2001). A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77, 1–4, 19–43.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., ... Wyser, K. (2005). A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *Reports Meteorology and Climatology, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden*, 108, 1–54.
- Marzban, C. i Sandgathe, S. (2008). Cluster Analysis for Object-Oriented Verification of Fields: A Variation. *Monthly Weather Review*, 136 (3), 1013–1025, doi:10.1175/2007MWR1994.1.
- Marzban, C., Sandgathe, S. (2010). Optical flow for verification. *Optical flow for verification*, 25, 1479–1494, doi:10.1175/2010WAF2222351.1.
- Meijgaard, E., Ulft, L.H., Berg, W.J., Bosveld, F. C., Hurk, B.J.J.M., Lenderink, G. i Siebesma, A. P. (2008). *The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1. KNMI Technical Report 302* (strony 1–43). Pobrano z lokalizacji KNMI, Postbus 201, 3730 AE, De Bilt, The Netherlands: <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubtr/tr302.pdf>
- Mitchell, J.F.B. i Van Der Linden, P. (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research* (strony 1–160). Pobrano z lokalizacji Met Office Hadley

Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK:
http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/ensembles_final_report_nov09.pdf

R Development Core Team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Pobrano z lokalizacji R Foundation for Statistical Computing: <http://www.r-project.org/>

Streszczenie

Zastosowanie metod przepływu optycznego i krytycznego indeksu sukcesu do weryfikacji opadu w symulacjach klimatycznych dla Polski. Znajomość przyszłych charakterystyk klimatu jest nieodzowna do stworzenia planów adaptacyjnych. Modele numeryczne dostarczają takiej informacji, ale ważną kwestią jest prawidłowa ocena wiarygodności pozyskanej informacji. Ten ważny problem rozwiązuje się poprzez ocenę zdolności odtworzenia przez modele klimatu przeszłego, zakładając, że rodzaj i wielkość błędu dla okresu referencyjnego są przenoszone przez modele na okres scenariuszowy. W pracy przedstawiona została analiza odtworzenia opadu w okresie 1971–1990 przez wybrane modele stosowane w projekcie EU ENSEMBLES. Analizie zostały poddane warunki opadowe opisane za pomocą wskaźników klimatycznych opartych na dobowej sumie opadu. Mapy wskaźników klimatycznych porównywane są dwiema metodami. Pierwsza z metod, nazywana metodą przepływu optycznego, polega na ocenie wielkości określających przekształcenie lokalnie przeprowadzające jedno pole w drugie. Druga z metod polega na zastosowaniu techniki analizy skupień do połączonych pól porównywanego i referencyjnego. Za pomocą tych metod można w sposób zobiektywizowany przeprowadzać ewaluację symulacji klimatycznych.

Summary

Application of the optical flow and critical success index methods to verification of precipitation in climate simulations over Poland. Knowledge of characteristics of future climate is essential to create adaptation plans. Numerical models can provide such information but an important issue is the correct assessment of reliability. This important problem can be solved by evaluating the ability of a model to reproduce past climate. It is assumed that the type and amount of error in the reference period is transferred to a scenario period. In this paper, the reconstruction of precipitation in 1971–1990 period by models selected from the EU ENSEMBLES project was analyzed. Analyses were subjected to precipitation conditions described by climatic indices based on daily sum of precipitation. Climate indices maps were compared by two methods. The first method is called optical flow method, and consists of assessing the parameters of a local transformation of fields. The second method uses the cluster analysis technique to a combined field consisting of reconstructed and reference values. These methods allow to perform an objectified evaluation of climate simulations.

Authors' addresses:

Krystyna Konca-Kędziarska
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa
Poland
e-mail: krystyna.konca@imgw.pl

Małgorzata Liszewska
Interdyscyplinarne Centrum Modelowania
Matematycznego i Komputerowego
Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Prosta 69, 00-838 Warszawa
Poland
e-mail: m.liszewska@icm.edu.pl