

PRZYKŁADY WYKORZYSTANIA NUMERYCZNEJ PROGNOZY POGODY W PROCESIE WSPOMAGANIA PODEJMOWANIA DECYZJI

Maciej WRONA, Karolina SZAFRANEK

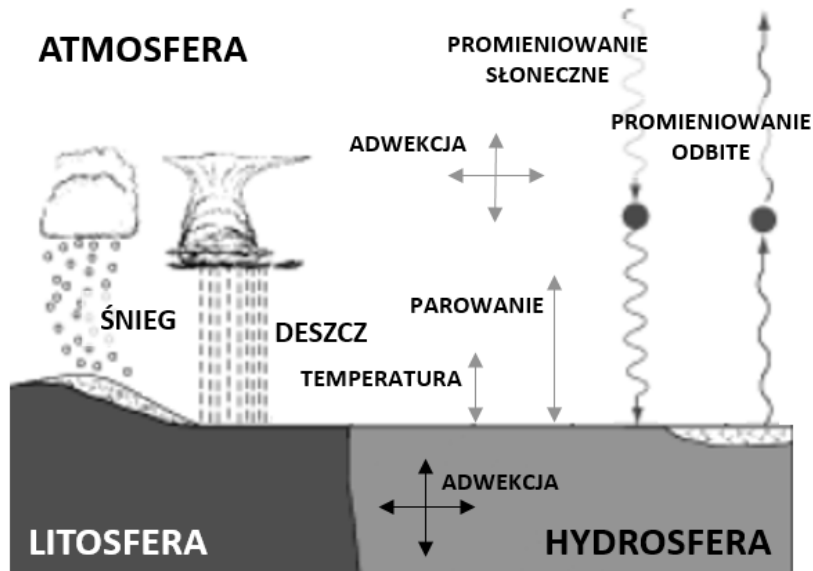
Streszczenie: Niniejszy artykuł prezentuje przykłady implementacji numerycznych modeli prognozy pogody w procesie zarządzania Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Komputerowego i Matematycznego Uniwersytetu Warszawskiego jest ośrodkiem prowadzącym działalność naukową związaną z wykorzystaniem modelowania matematycznego w wielu dziedzinach nauki. Jeden z kluczowych obszarów aktywności ICM UW realizowany jest przez Sekcję Modelowania Środowiska Naturalnego w ramach której prowadzone są prace nad utrzymaniem i rozwijaniem serwisów prezentujących wyniki numerycznych modeli prognozy pogody. Uzyskanie operacyjności systemów obliczeniowych umożliwiło zbudowanie nowych, złożonych produktów i serwisów prognostycznych dedykowanych potrzebom wybranych branż. Artykuł prezentuje wyniki wdrożenia tych prac w różnych sektorach gospodarki.

Słowa kluczowe: Numeryczny Model Prognozy Pogody, Numerical Weather Forecast, wspieranie procesu podejmowania decyzji,

1. Wprowadzenie

Pojęcie numerycznej prognozy pogody sięga swym początkiem lat 20. XX wieku kiedy podjęto działania zmierzające do opisanie w formie zależności matematycznych zjawisk odbywających się w atmosferze ziemskiej. Zbudowane na podstawie empirycznych obserwacji modele mogły zostać efektywnie użyte dopiero w połowie XX wieku, kiedy możliwe było wykorzystanie maszyn obliczeniowych jak ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) wykorzystywany na Uniwersytecie w Pensylwanii od 1945 roku [9]. Wraz ze wzrostem możliwości maszyn obliczeniowych rozwojowi ulegały algorytmy pozwalające na efektywne modelowanie zjawisk takich jak burze tropikalne czy określających jakość powietrza [1]. Od końca XX wieku modele wzbogacano o nowe algorytmy związane z procesami fizycznymi w obrębie gleby i roślinności znacząco zwiększając sprawdzalność i długość prognoz [2, 4].

Dziś numeryczne modele pogody korzystają z algorytmów opartych na równaniach różniczkowych opisujących zjawiska fizyczne w litosferze, hydrosferze i atmosferze Ziemi (rys.1). W większości, modele opierają się na równaniach pierwotnych, określanych w meteorologii jako równania Naviera-Stoeksa [9]. Opisują one hydrodynamiczny przepływ płynów na obracającej się sferze. Na bazie tych relacji budowane są pola temperatur, ciśnienia czy wiatru. Dodatkowe algorytmy pozwalają na uwzględnienie takich zjawisk jak np. propagacja zanieczyszczeń [10].



Rys. 1. Zjawiska fizyczne zachodzące w bliskim otoczeniu kuli ziemskiej uwzględniane w modelach pogodowych (źródło: NOAA)

2. Modele prognostyczne prowadzone w ICM

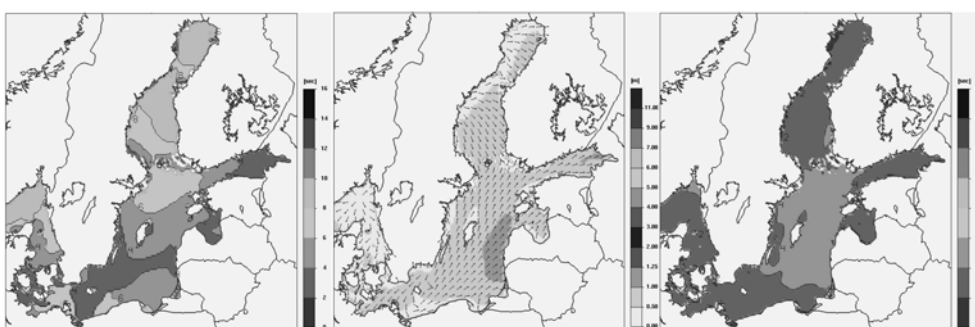
ICM UW realizuje prace badawcze i wdrożeniowe w zakresie numerycznych modeli pogody od 1997 roku. Sekcja Modelowania Środowiska Naturalnego ICM UW eksploatuje obecnie trzy numeryczne modele pogody. Redundancja rozwiązań pozwala na prowadzenie ciągłej kontroli nad jakością prognoz w obrębie wybranych parametrów meteorologicznych. Badania realizowane przez SMSŃ obejmują zarówno prognozy krótkookresowe (o horyzoncie czasowym do 72 godzin) jak i długookresowe projekcje klimatyczne (o horyzoncie czasowym do 2090 roku).

2.1. Prognozy krótkookresowe

Jednym z najdłużej utrzymywanych w ICM UW modeli jest COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System). Pozwalana on na prognozowanie warunków meteorologicznych oraz parametrów morza (temperatura, falowanie) z rozdzielczością przestrzenną 13km. Długość prognozy wynosi 108 godzin. W chwili obecnej model uruchamiany jest dwa razy na dobę i jest wykorzystywany między innymi w serwisie WAM – prognozie falowania Morza Bałtyckiego. W serwisie tym z wyprzedzeniem 48 godzin prognozowane są specjalistyczne parametry jak wysokość fali znaczącej oraz jej kierunek, średni okres fali czy okres piku widma (rys. 2). COAMPS był do niedawna używany również jako model do prognozowania parametrów atmosferycznych, jednak ze względu na wprowadzanie nowych, bardziej rozbudowanych modeli pogodowych, pełni głównie rolę zasilania serwisu WAM stanowiąc jednocześnie dodatkowe źródło weryfikacji prognoz z pozostałych modeli.

Na dzień publikacji artykułu głównym źródłem prognoz meteorologicznych jest otwarty model WRF (Weather Research and Forecasting Model). Model został opracowany przez

wiodące ośrodki naukowe w tym: National Center for Atmospheric Research (NCAR – Narodowe Centrum Badań Atmosfery Stanów Zjednoczonych), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA – Amerykańska Narodowa Służba Oceaniczna i Meteorologiczna), Air Force Weather Agency (AFWA – Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych), Naval Research Laboratory (NRL – Laboratorium Badań Morskich USA) oraz Uniwersytet Oklahomy. Umożliwia on prognozowanie ponad setki parametrów w okresie do 120 godzin. Jedną zaletą modelu jest możliwość generowania prognoz na siatce o wysokiej rozdzielczości sięgającej w tym przypadku 3,4km. Do kolejnych zalet zaliczyć można wysoką elastyczność umożliwiającą budowanie specjalistycznych prognoz oraz prowadzenie złożonych i wielowariantowych symulacji.



Rys. 2. Mapy prognostyczne serwisu WAM, kolejno: okres piku widma fali; wysokość fali znaczącej oraz jej kierunek; średni okres fali

Modele WRF i COAMPS opierają się na danych startowych globalnego modelu GFS (Global Forecast System). Prognozy GFS nie są wyznaczane w ICM UW, a pozyskiwane z NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Model umożliwia generowanie prognoz w okresie do 384 godzin z rozdzielczością przestrzenną od 23km do 70km. Model ten jest bezpłatnie udostępniany przez NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) stąd jego duża popularność, również wśród przedsiębiorstw komercyjnych. Mimo globalnego pokrycia, niska rozdzielczość modelu sprawia, iż jego sprawdzalność w wymiarze lokalnym dla wielu specjalistycznych zastosowań jest zbyt niska.

Modelem o największej rozdzielczości przestrzennej wykorzystywanym obecnie w ICM UW jest model UM (Unified Model). Model został opracowany i jest rozwijany przez MetOffice – narodową służbę meteorologiczną Wielkiej Brytanii. MetOffice uruchamia globalny model UM o rozdzielczości przestrzennej 25km i okresie prognozowania 168 godzin. Dane zasilające model globalny pochodzą z danych satelitarnych, sond i stacji pomiarowych rozmieszczonych na powierzchni planety. Dla wybranych lokalizacji model jest zagnieżdżany dając rozdzielczość przestrzenną ok. 1km co pozwala na prognozowanie zjawisk meteorologicznych o lokalnym charakterze, jak np. opad konwekcyjny.

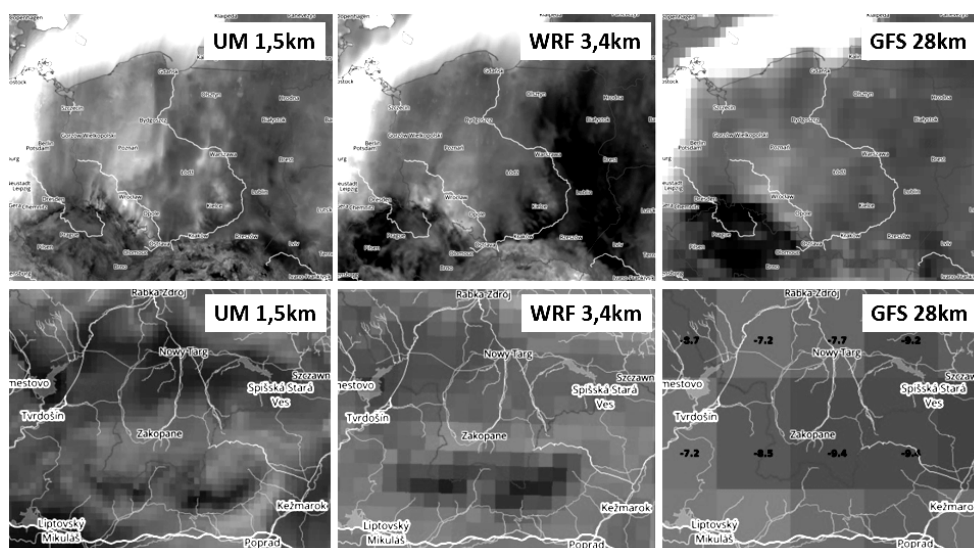
Zestawienie numerycznych modeli pogodowych wykorzystywanych przez SMSN ICM UW przedstawia tabela 1.

Na rysunku 3 przedstawiono mapy pogodowe dla obszaru Polski (na górze) oraz Zakopanego (na dole) wygenerowane za pomocą modeli UM, WRF i GFS. Różnice w rozdzielczości modeli są szczególnie widoczne w ujęciu regionalnym. Fragmenty map wygenerowane dla regionu miasta Zakopane obejmują w przypadku modelu UM ok. 2000 indywidualnych pól którym przypisane zostały parametry meteorologiczne (w tym

wypadku wartość temperatury na wys. 2m powyżej poziomu gruntu. Ten sam obszar model WRF o rozdzielczości przestrzennej 3,4km pokrywa z użyciem ok. 450 pól, a model GFS tylko dziesięciu. Zestawienie to daje pogląd na różnice w szczegółowości i jakości prognoz generowanych przez modele o różnej rozdzielczości przestrzennej.

Tabela 1. Zestawienie numerycznych modeli pogody wykorzystywanych przez SMŚN ICM UW

	GFS	COAMPS	WRF	UM
Rozdzielczość przestrzenna [km]	23 – 70	13	3,4	1,5 - 4
Długość prognozy [h]	384	108	120	78
Liczba aktualizacji / 24h	4	2-4	4	1-4
Pokrycie globalne	TAK	RELOKACJA	RELOKACJA	NIE



Rys. 3. Zestawienie map prognostycznych opracowanych na bazie trzech rodzajów modeli (UM, WRF, GFS) o różnej rozdzielczości przestrzennej. Ilustracje na górze rysunku przedstawiają obszar Polski. Ilustracje w dolnej części rysunku przedstawiają region otaczający Miasto Zakopane (mapy.meteo.pl)

2.2. Projekcje klimatyczne

Oprócz opisanych w rozdziale 2.1 modeli prognozy pogody, ICM UW posiada unikatową bazę scenariuszy zmian klimatu dla Polski opracowaną na zlecenie Ministra Środowiska stanowiącą podstawę najróżniejszych opracowań adaptacyjnych w Polsce. Obliczenia oparte zostały o regionalne symulacje klimatu przeprowadzone w ramach projektu ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com/index.html>) dla scenariusza

emisji gazów cieplarnianych SRES A1B. Wszystkie parametry klimatyczne mają rozdzielczość przestrzenną ok. 25x25 km, czasową miesięczną lub sezonową. Baza jest aktualizowana przy użyciu modeli najnowszej generacji. ICM UW prowadzi jedyny w Polsce serwis pozwalający na samodzielne określenie parametrów i indeksów klimatycznych dla wybranych scenariuszy klimatycznych (<http://klimat.icm.edu.pl>). Na bazie tych narzędzi możliwe jest regionalne określenie zmian klimatycznych w horyzoncie czasowym do 2090 roku. Analizy oceny wpływu zmian klimatu na procesy i infrastrukturę są kluczowe w długofalowym zarządzaniu projektami na poziomie strategicznym [8].

3. HPC w ICM

Realizacja obliczeń na potrzeby prowadzonych modeli wymaga wysoce wydajnego zaplecza technicznego w postaci komputerów dużej mocy HPC (ang. High Power Computing). Do 2016 roku do wyznaczania prognoz wykorzystywane były dwie maszyny: Topola i Boreasz. Pierwsza z nich to 28 rdzeniowy klaster oparty na procesorach IntelHaswell działający w infrastrukturze PL-Grid. Boreasz to druga z maszyn zlokalizowana w serwerowni w siedzibie ICM przy ul. Pawińskiego. Klaster oparty na konstrukcji IBM Power 775 i procesorach Power7. W połowie 2016 roku pracę rozpoczęło centrum superkomputerowe ICM UW na warszawskiej Białołęce (Rys. 4). W specjalnie zaprojektowanym budynku uruchomiono superkomputer OKEANOS który ma stanowić główną maszynę obliczeniową dla numerycznych modeli pogodowych.



Rys. 4. Nowe centrum superkomputerowe ICM UW na warszawskiej Białołęce

4. Obszary zastosowań numerycznej prognozy pogody – studium przypadku

Ze względu na wpływ na procesy gospodarcze, znaczenie wiarygodnego prognozowania warunków meteorologicznych jest bardzo wysokie [3]. Synergia wydajnych maszyn obliczeniowych z efektywnymi algorytmami pozwala na rozwijanie usług i serwisów wybiegających funkcjonalnością daleko poza proces prognozy podstawowych parametrów meteorologicznych. Budowana w ten sposób nowa jakość wymaga bardzo bliskiej współpracy ze specjalistami branżowymi ze względu na wysublimowane ramy techniczne i wąską specjalizację branż.

4.1. Wykorzystanie prognoz meteorologicznych w energetyce

Warunki meteorologiczne mają bezpośredni związek z ilością energii generowaną przez OZE (Odnawialne Źródła Energii), w szczególności energii generowanej przez farmy wiatrowe i ogniwa fotowoltaiczne. W przypadku farm wiatrowych kluczowa jest prędkość wiatru na odpowiedniej wysokości (choć znaczenie mają także inne parametry meteorologiczne), w przypadku ogniw fotowoltaicznych – natężenie promieniowania słonecznego. Znajomość wiarygodnych (tj. możliwie najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistych) prognoz meteorologicznych pozwala na oszacowanie ilości energii mającej być wyprodukowaną przez OZE w perspektywie kilku dni, co jest konieczne w przypadku jej wprowadzenia na rynek energii elektrycznej (z uwagi na specyfikę energii da się ją magazynować jedynie w niewielkim stopniu, co oznacza, że ilość energii wytworzonej musi odpowiadać ilości energii pobieranej; <http://www.rynek-energii-elektrycznej.cire.pl>). Z uwagi na różną rozdzielczość przestrzenną, długość prognozy oraz sprawdzalność (<http://weryfikacja.icm.edu.pl>) wszystkie modele wykorzystywane w ICM UW znajdują zastosowanie w energetyce. Oprócz prognozowania generowanej energii na podstawie prognoz bieżących, prognozy archiwalne (ICM UW dysponuje danymi prognostycznymi z okresu około 20-letniego) mogą stanowić podstawę do wyboru optymalnej lokalizacji dla nowo instalowanych źródeł. Przykład wykorzystania prognoz ICM UW dla analiz energetycznych związanych ze zbilansowaniem mocowym i energetycznym różnorodnych wariantów współpracy OZE (paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych i biogazowni) przedstawiony został w [11].

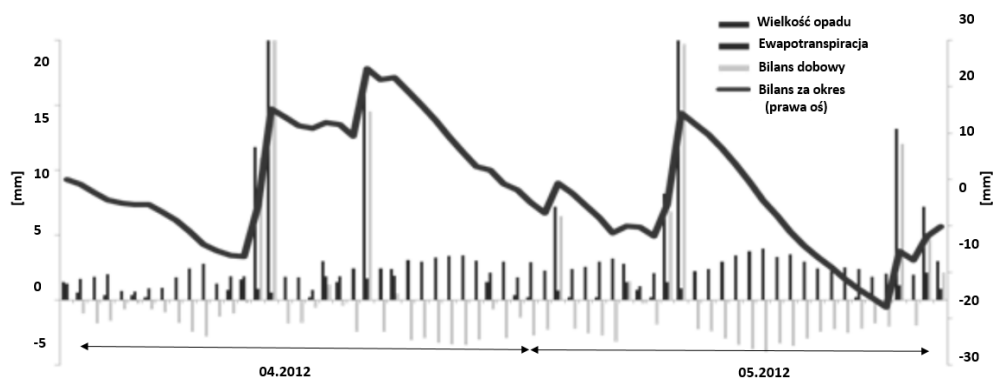
Warunki meteorologiczne mają także istotne znaczenie w przypadku sieci elektroenergetycznych. Uwzględnienie warunków meteorologicznych takich jak temperatura i siła wiatru pozwala ocenić maksymalną obciążalność sieci w danym momencie. Niska temperatura i wiatr zwiększają maksymalną ilość energii, która może być przesyłana siecią, a wysoka temperatura obniża tę wartość z uwagi na niebezpieczeństwo przegrzania się sieci. Powszechnie stosuje się podejście statyczne zarządzania sieciami energetycznymi wprowadzające podział na dwa potencjalne stany pogodowe: okres „letni” i okres „zimowy”. Takie uproszczenie powoduje niebezpieczeństwo przegrzania sieci kiedy panujące warunki meteorologiczne znacząco różnią się od przeciętnych warunków w tym czasie oraz nie wykorzystywanie maksymalnych wartości przesyłanej energii z uwagi na przyjęte założenie, że warunki meteorologiczne są gorsze niż w rzeczywistości. W ramach projektu „Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych” (<http://www.sdzp.pl>) realizowanego przez konsorcjum pod kierownictwem firmy Procesy Inwestycyjne (konkurs GEKON finansowany przez NCBiR i NFOŚiGW) wykorzystano prognozy ICM UW w celu optymalnego zarządzania przesyłaną energią przy uwzględnieniu prognozy chwilowych parametrów pracy linii NN i WN (m.in. maksymalnej obciążalności sieci) dla różnych obszarów. Dodatkowo przeprowadzone testowe obliczenia mające na celu korelację prognoz i pomiarów in-situ, a także oszacowano wpływ podstawowych danych meteorologicznych na występujące oblodzenie, co stanowi wstęp do prognozowania oblodzenia sieci energetycznych.

4.2. Zastosowanie prognoz w rolnictwie, sadownictwie i leśnictwie

Przykładem różnorodnego wykorzystania prognoz ICM UW w gospodarce są działania prowadzone w ramach projektu PROZA (Platforma wspomagania decyzji Operacyjnych

Zależnych od stanu Atmosfery, <http://projekt-proza.pl>) realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Jednym z zadań było prognozowanie gwałtownych zjawisk konwekcyjnych na podstawie zobrażeń satelitarnych MSG [11]. Do weryfikacji poprawności zastosowanego algorytmu wykorzystano dane radarowe, a także prognozy meteorologiczne ICM UW [12].

Szczególnym obszarem aplikacji prognoz jest rolnictwo, sadownictwo i leśnictwo. Warunki pogodowe są jednym z najistotniejszych czynników wpływających na wielkość i jakość upraw. Susze i przymrozki mogą powodować znaczne straty, jednak można im przeciwdziałać minimalizując ich następstwa przy znajomości wiarygodnych prognoz. W tym celu stworzono serwis prognozowania przymrozków oraz serwis bilansu wodnego umożliwiający prognozowanie wilgotności gleby. Wiedząc o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia przymrozków, można podjąć próby podgrzewania powietrza na terenie danego sadu. W ramach projektu wykonano testy takiej metody. Prognozy wilgotności gleby pozwalają z kolei na racjonalne planowanie procesu nawadniania i oszczędność wody. Rysunek 5 przedstawia wyniki pomiarów testowych serwisu prognozy bilansu wodnego. Serwis wyznacza przewidywany poziom ewapotranspiracji potencjalnej ETo oraz prognozuje występowanie opadów [7]. Opracowanie danych pozwala na wyznaczenie bilansu wodnego upraw sadowniczych [6]. Pozwala to w dalszych krokach na opracowanie lokalnego systemu informacji o potencjalnym rozwoju chorób roślin i zaleceniach nawodnieniowych roślin sadowniczych [5].



Rys. 5. Wykres wartości dobowego i okresowego bilansu wodnego wyznaczony w oparciu o model ewapotranspiracji i wielkości opadów

W chwili obecnej oba serwisy są modernizowane i dostosowywane do obecnie uruchamianych w ICM UW modeli meteorologicznych. Zostaną ponownie operacyjnie uruchomione w pierwszej połowie 2017 roku. Trwają także prace nad serwisem meteorologicznym dedykowanym żeglarstwu.

Jednym z kierunków rozwoju numerycznych serwisów prognozy pogody stanowią prace nad modelami wysokorozdzielczymi. Regionalne modele mezoskalowe (o rozdzielczości przestrzennej poniżej 10km) pozwalają na modelowanie parametrów meteorologicznych o charakterze lokalnym. Dla realizacji tego typu serwisów niezbędne jest wykorzystanie Numerycznego Modelu Terenu (lub Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu) o odpowiednio wysokiej rozdzielczości, pozwalającej na odtworzenie topografii

terenu z wyższą dokładnością. Dzięki temu model prognostyczny ma możliwość uwzględnienia ukształtowania terenu w lokalnych zjawiskach pogodowych.

5. Wnioski

Wnioski płynące z doświadczeń wyżej opisanych projektów można zawrzeć w następujących punktach:

1. Bardziej rozbudowane algorytmy modelowania zjawisk fizycznych w połączeniu z rosnącymi możliwościami maszyn obliczeniowych pozwalają na uzyskiwanie coraz lepszej jakości (wiarygodności) i rozdzielczości prognoz.
2. Dla pełnego pokrycia potrzeb różnych grup odbiorców konieczne jest budowanie serwisów dedykowanych biorących pod uwagę kluczowe z punktu odbiorcy końcowego parametry.
3. Efektywna osłona meteorologiczna umożliwi znaczącą redukcję ryzyka poprzez minimalizację oczekiwanych skutków warunków meteorologicznych na podmioty i procesy.

Literatura:

1. Baklanov A., Grimmond S., Mahura A.: *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*. Springer, 2009, pp. 11–12. ISBN 978-3-642-00297-7. Retrieved 2011-02-24
2. Harper K.: Uccellini L. W., Kalnay E., Carey K., Morone L.: "50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction". *Bulletin of the American Meteorological Society*. 88 (5): May 2007, pp. 639–650. Bibcode:2007BAMS...88..639H. doi:10.1175/BAMS-88-5-639
3. Lazo J. K., Lawson M., Larsen P. H., Waldman D. M.: *United States Economic Sensitivity to Weather Variability*.¹ *Bulletin of the American Meteorological Society*. June 2011, 92.
4. Lynch P.: "The origins of computer weather prediction and climate modeling" (PDF). *Journal of Computational Physics*. University of Miami. 227 (7), March 2008, 3431–44. Bibcode:2008JCoPh.227.3431L. doi:10.1016/j.jcp.2007.02.034. Retrieved 2010-12-23.
5. Mychayliv O., Sierota Z., Lech P.: Influence of weather conditions on assimilative apparatus diseases occurrence in young stands; *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, ISSN 1732 – 5587, t. 6, 2011 Polska Akademia Nauk – Oddział w Krakowie, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.
6. Jakubiak B., Hodur R.: Impact of an implementation of advanced scheme of land surface – atmosphere interactions on the quality of the forecasts of the COAMPS model; *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, ISSN 1732 – 5587, t. 6, 2011 Polska Akademia Nauk – Oddział w Krakowie, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.
7. Kurza M. B., Walkowiak S., Rudnicki W. R.: Forecasting the potential evapotranspiration in the orchard with the numerical weather forecast; *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, ISSN 1732 – 5587, t. 6, 2011 Polska Akademia Nauk – Oddział w Krakowie, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.
8. *Poradnik Przygotowania Inwestycji z uwzględnieniem zmian klimatu, ich łagodzenia i przystosowania do tych zmian oraz odporności na klęski żywiołowe*”, Ministerstwo Środowiska, Departament Zrównoważonego Rozwoju, Październik 2015, Warszawa.

9. Shuman F. G.: "History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center". *Weather and Forecasting*. 4 (3), September 1989, pp. 286–296, doi:10.1175/15200434(1989)004<0286:HONWPA>2.0.CO;2. ISSN 1520-0434.
10. Steyn, D. G.: *Air pollution modeling and its application VIII*, Volume 8. Birkhäuser, 1991, pp. 241–242. ISBN 978-0-306-43828-8.
11. Szafranek K., Jakubiak B., Lech R., Tomczuk M. "Mesoscale Convective Systems Monitoring on the Basis of MSG Data – Case Studies" - *Artificial Satellites*. Vol. 50, Issue 2, s. 91–103, ISSN (Online) 2083-6104, DOI: 10.1515/arsa-2015-0007, 2015
12. Walkowiak S., Ligowski Ł., Wawruch K., Rudnicki W. R.; *Information Technologies in Environmental Engineering – New Trends and Challenges*, Environmental Science and Engineering 3, DOI: 10.1007/978-3-642-19536-5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

Dr inż. Karolina SZAFRANEK

Dr inż. Maciej WRONA

Sekcja Modelowania Środowiska Naturalnego

Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Komputerowego i Matematycznego

Uniwersytet Warszawski

Ul. Prosta 69

00-838 Warszawa

email: kszafran@icm.edu.pl

mwrona@icm.edu.pl