

*Bogumił Jakubiak, Richard Hodur*

**WPLYW WŁĄCZENIA ZAAWANSOWANEGO MODUŁU  
ODDZIAŁYWANIA PODŁOŻA Z ATMOSFERĄ  
NA JAKOŚĆ PROGNOZ MODELU „COAMPS”**

---

***IMPACT OF AN IMPLEMENTATION OF ADVANCED  
SCHEME OF LAND SURFACE  
– ATMOSPHERE INTERACTIONS ON THE QUALITY  
OF THE FORECASTS OF THE “COAMPS” MODEL***

**Streszczenie**

W ICM na Uniwersytecie Warszawskim działa operacyjnie kilka modeli numerycznych prognoz pogody. Na przykładzie modelu COAMPS, rozwijanego od kilku lat, omówiono główne elementy systemu numerycznych prognoz pogody, z ukazaniem złożoności takiego systemu i rozproszonego środowiska obliczeniowego, w którym system prognoz numerycznych działa. We współczesnych systemach numerycznych prognoz pogody jakość i skomplikowanie każdego z jego elementów ma swój wpływ na ostateczną jakość wyników. Dla zastosowań agrometeorologicznych szczególnie istotny jest moduł oddziaływania podłoża z atmosferą. Przedstawiono wyniki eksperymentów dotyczących wpływu włączenia do standardowego systemu Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS) zaawansowanego modelu powierzchni gruntu NOAH opracowanego przez kilka amerykańskich instytucji. Do oceny zachowania się tego modułu połączonego z modelem numerycznych prognoz pogody o wysokiej rozdzielczości COAMPS wykorzystano zarówno wybrane przypadki konwekcji przy dobrej pogodzie jak i konwekcyjnych okresów burzowych. Eksperymenty opracowano w taki sposób, żeby różne warunki podłoża (wilgotna powierzchnia gruntu w trakcie burz oraz sucha powierzchnia gruntu w dni z dobrą pogodą) wraz z różnorodnością sytuacji atmosferycznych mogły być wykorzystane do pogłębienia naszego rozumienia zachowania modelu numerycznych prognoz pogody.

**Słowa kluczowe:** numeryczne prognozy pogody, strumienie ciepła i wilgoci w gruncie, model powierzchni łądu

### Summary

*Land surface parameterizations in numerical weather prediction models direct the exchange of energy between the land surface and the atmosphere. The main purpose of this paper is to gain insight into how surface heterogeneity can influence the modeled convective boundary layer, and whether the complexity of the modeled land-atmosphere interactions can improve forecasts of convective precipitation. To achieve this the NOAH land-surface model has been coupled to the Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). Selected cases of fair weather convective conditions and convectively produced rain episodes were used to evaluate the behavior of a land-surface model coupled to a high-resolution numerical weather prediction system. Our experiments are designed such that different surface conditions (wet soil during rain episodes and dry soil conditions during fair weather days) and different atmospheric situations could be used to further our understanding of the behavior of the model by comparing model solutions to surface observations.*

**Key words:** *numerical weather prediction, surface heat fluxes, land-surface model*

### WSTĘP

Atmosfera, a bardziej ogólnie ziemski system klimatyczny jest bardzo skomplikowanym, wysoce nieliniowym układem ze zjawiskami zachodzącymi w wielu różnych skalach czasowych i przestrzennych. Rozwiązanie w pełni nieliniowego układu równań fizyki atmosfery jest wyjątkowo trudne dla większości problemów meteorologicznych. Dla konkretnych problemów do rozwiązania zwykle stosuje się uproszczenia równań podstawowych. Na przykład wprowadzenie skalowania umożliwia eliminację członów równań o wielkości małej w porównaniu do pozostałych członów równania. Popularne jeszcze kilka lat temu hydrostatyczne modele atmosfery były konstruowane przy założeniu, że pochodna czasowa prędkości pionowej jest zaniedbywana, a prędkość pionowa jest diagnozowana z równania ciągłości. Uproszczone w ten sposób równania opisują wówczas atmosferę pozbawioną fal akustycznych, co dla większości zastosowań meteorologicznych było do przyjęcia. Obecnie zasoby obliczeniowe dużych ośrodków meteorologicznych (w tym również ICM) pozwalają na eksploatację modeli opisujących wszystkie zjawiska występujące w atmosferze, w tym również fale akustyczne, co okazało się przydatne w obszarach o silnym rozwoju konwekcji.

### ELEMENTY SYSTEMU NUMERYCZNYCH PROGNOZ POGODY

Każdy system numerycznych prognoz pogody jest złożonym układem informatycznym składającym się z kilku podstawowych podsystemów: modułu wstępnego przetwarzania i asymilacji danych, modelu numerycznej prognozy

pogody realizowanego w postaci algorytmu obliczeniowego z wykorzystaniem aproksymacji nieliniowych równań fizyki atmosfery wraz z parametryzacją szeregu procesów fizycznych występujących w atmosferze w skalach mniejszych niż opisywane dla przyjętej rozdzielczości oraz z modułu przetwarzania wyników końcowych do postaci umożliwiającej ich prezentację. Wyniki modelu w postaci map, wykresów i meteorogramów są dostarczane nieodpłatnie użytkownikom publicznym przez odpowiednią stronę internetową. Natomiast przetworzone wyniki numeryczne docierają do użytkowników wyspecjalizowanych, którymi mogą być zarówno inne modele ziemskiego systemu klimatycznego (na przykład hydrodynamiczny model oceanu, czy model falowania) jak i odbiorcy wykorzystujący dane punktowe poprzez różne modele statystycznej interpretacji bezpośrednich wyników numerycznych prognoz pogody. Poniżej pokrótce omówiono poszczególne moduły tak zarysowanego systemu.

*Wstępne przetwarzanie:* Hydrodynamiczne równania różniczkowe fizyki atmosfery należą do klasy zadań początkowo-brzegowych, co oznacza, że do ich rozwiązania potrzebne jest zarówno określenie stanu początkowego, oraz, co jest równie ważne, dostarczenie informacji na cały okres prognozy w punktach brzegowych obszaru, na którym model został posadowiony. Współczesne modele numerycznych prognoz pogody rozwiązywane są metodą siatek, która polega na stworzeniu regularnej, trójwymiarowej siatki obliczeniowej o zadanej rozdzielczości, w węzłach której zadane są wartości podstawowych elementów meteorologicznych opisujących atmosferę (temperatura, składowe wiatru, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne). Równania różniczkowe zamienia się na różnice skończone i posuwając się drobnymi kroczkami (co najwyżej kilku minut) do przodu uzyskuje się rozwiązania w kolejnych chwilach czasowych, aż do osiągnięcia prognozy na zadany termin, na przykład na 72 godziny od terminu stanu początkowego.

*Asymilacja danych:* Podstawowym zadaniem modułu asymilacji danych jest uzyskanie jak najlepszego stanu początkowego atmosfery, gdyż im lepszy stan początkowy, tym lepsza prognoza końcowa modelu numerycznego. Istnieje kilka różnych metod asymilacji danych, jednak wszystkie sprowadzają się do tego, że dostępne wstępne przybliżenie stanu początkowego jest modyfikowane informacją zawartą w nowych obserwacjach stanu atmosfery. Zwykle za wstępne przybliżenie przyjmuje się poprzednią prognozę oszacowaną na termin pojawienia się nowych obserwacji. Zadanie asymilacji wymaga operacyjnego pozyskiwania danych z rozproszonej sieci obserwacyjnej a zadanie określenia warunków brzegowych dostępu do wyników obliczeń modeli globalnych z innych światowych ośrodków meteorologicznych. Tak więc oba te zadania wymagają szybkiej i niezawodnej transmisji danych łączami szerokopasmowymi o dużej przepustowości, mogą być realizowane tylko w wydzielonych ośrodkach obliczeniowych i stanowią bardzo dobry przykład rozproszonej sieci obliczeniowej o zasięgu światowym. Do określenia optymalnego stanu początkowego

wykorzystuje się każdą dostępną informację. Są to informacje naziemne z synoptycznych stacji meteorologicznych zawierających pomiary temperatury, wiatru i wilgotności, radiosondaże atmosfery dające pionowy rozkład temperatury i wiatru, dane z rejsowych samolotów pasażerskich, które zebrane w trakcie startu samolotu i jego lądowania stanowią cenną informację o pionowym profilu temperatury, oraz dane satelitarne i radarowe mierzone zdalnie.

*Model prognostyczny:* każdy hydrodynamiczny model prognozy pogody składa się z kilku części: modułu numerycznego (solwera) rozwiązującego równania dynamiki atmosfery jedną z efektywnych metod obliczeniowych (na przykład metodą siatek), modułów opisujących podstawowe procesy fizyczne wymagające parametryzacji (oszacowania zmiennych meteorologicznych dla skal mniejszych od przestrzennej rozdzielczości modelu przy pomocy zmiennych opisywanych przez model) oraz procesy fizyczne rozwiązywane w sposób jawny. Uwzględnia się między innymi następujące procesy fizyczne: promieniowanie słoneczne i ziemskie, wymianę ciepła i wilgoci między podłożem a atmosferą, procesy w warstwie granicznej atmosfery, procesy konwekcyjne, autokonwersję kropeł chmurowych i kryształków lodu w opad, przemiany fazowe wody w atmosferze.

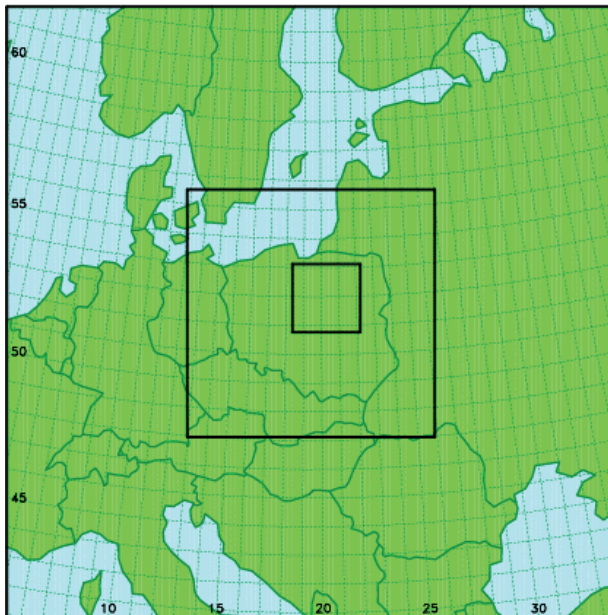
*Przetwarzanie wyników:* Pozornie najprostsze zadanie dostarczenia wyników odbiorcom jest, z uwagi na liczbę wykonywanych map i wykresów równie kosztowne jak asymilacja danych i wymaga silnych stacji roboczych i rozbudowanych stron internetowych zaopatrzonych w mechanizmy szybkiego pobierania danych. Natomiast statystyczna interpretacja wyników wymaga szybkiego dostępu do wieloletnich danych archiwalnych i wyrafinowanych algorytmów uczenia maszynowego.

## **OPIS ZASTOSOWANEGO MODELU NUMERYCZNYCH PROGNOZ POGODY**

ICM w sposób operacyjny eksploatuje dwa modele numerycznych prognoz pogody. Różne wersje modelu UM (Unified Model) opracowanego w Met Office w Wielkiej Brytanii są eksploatowane od roku 1997. Obecnie działa operacyjnie wersja 6.6 tego modelu. Drugim modelem wykorzystywanym w ICM od roku 2000 jest model COAMPS [Hodur 1997], udostępniony przez Laboratorium Badawcze Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych. Początkowo COAMPS był modelem badawczym, teraz operacyjnie działa wersja 3.1.1. Wyniki obu modeli (oraz modelu falowania dla Bałtyku) są dostępne publicznie na stronie ICM pod adresem <http://new.meteo.pl/>

Do obecnego opracowania wykorzystano wyniki testowanej wersji 4.2.2 modelu COAMPS [Jakubiak, Hodur 2010]. Model, wykorzystujący 40 poziomów w przekroju pionowym, został skonfigurowany w postaci zagnieźdzonych siatek zapewniających wysoką rozdzielczość niezbędną do naszych eksperymentów. W szczególności ustawiono tak obszary modelu, by zbadać, w jaki

sposób model symuluje opady konwekcyjne wykorzystując parametryzację procesów konwekcyjnych na siatce o 9 km kroku przestrzennym oraz jawną fizykę procesów wilgotnych na siatkach 3 km i 1 km (Rys. 1). Wyniki były weryfikowane punktowymi obserwacjami na wybranych stacjach agrometeorologicznych i pomiarami odbiciowości z sieci radarów IMGW dostępnymi w Centrum Danych Radarowych w Norrköping, Szwecja. We wszystkich eksperymentach model COAMPS wykorzystuje schemat turbulencji Mellora i Yamady z domknięciem 2.5, który rozwiązuje prognostyczne równanie dla energii kinetycznej i diagnostyczne równanie dla wielkości drugiego rzędu takich jak strumienie ciepła, pędu i wilgoci. Warstwa przypowierzchniowa jest parametryzowana zgodnie ze schematem Louisa, wykorzystującym wielomianowe funkcje opisujące masową liczbę Richardsona do bezpośredniego określenia strumienia ciepła odczuwalnego i ciepła utajonego na powierzchni gruntu oraz tarcia powierzchniowego. Konwekcja w chmurach jest parametryzowana z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Kain-Fritscha, lecz tylko dla siatki zewnętrznej o kroku przestrzennym 9 km. Dla siatek o wyższej rozdzielczości zastosowano jawny schemat fizyki procesów wilgotnych.



**Rysunek 1.** Struktura zagnieżdżonych siatek modelu COAMPS/NOAH ukazująca zasięg 9 km siatki zewnętrznej, środkowej siatki 3km oraz 1km siatki o wysokiej rozdzielczości

**Figure 1.** Triply-nested COAMPS grid structure for the COAMPS/NOAH experiments, showing the extent of the coarse (9 km), medium (3 km), and fine-mesh (1 km) grids

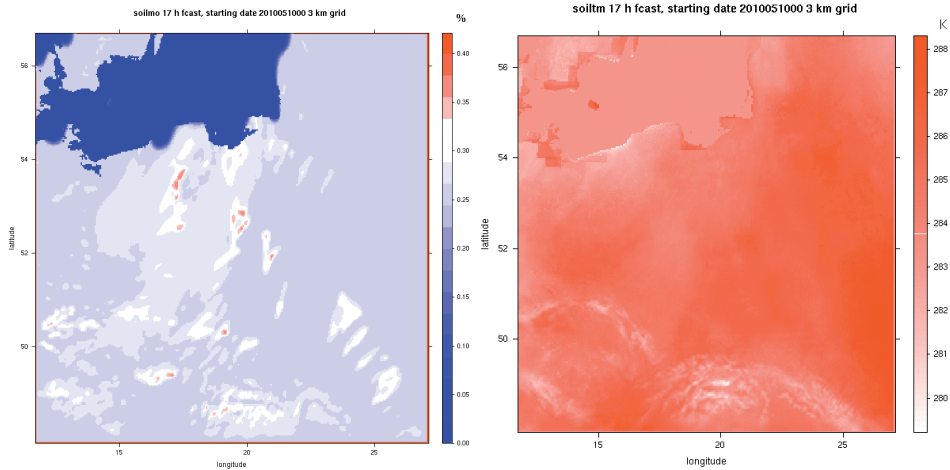
## **MODEL POWIERZCHNI ŁĄDU (LSM)**

W konfiguracji używanej w ICM prosty schemat wymiany pomiędzy podłożem a atmosferą zastąpiono współczesnym modelem hydrologii podłoża NOAH opracowanym kilka laty temu przez kilka amerykańskich instytucji [Ek i in. 2003]. Grunt w modelu NOAH, składa się z czterech warstw: cienkiej, wierzchniej warstwy o grubości 10-cm, drugiej płytkiej warstwy korzeni o grubości 20 cm, głębokiej warstwy korzeni o grubości 60 cm oraz podkorzeniowej warstwy o grubości 110 cm. W sumie modelowa głębokość gruntu zawiera 2m. Model NOAH rozwiązuje w sposób jawny równanie pionowego transportu w gruncie wykorzystując dyfuzyjną postać równania Richardsa oraz zależność wykładniczą pomiędzy przewodnictwem hydraulicznym gruntu, potencjałem metrycznym wody i objętościową zawartością wilgoci w każdej z warstw gruntu. Stopień infiltracji wylicza się jako różnicę pomiędzy sływem powierzchniowym a opadem docierającym do gruntu, który jest sumą opadu deszczu nie wchłoniętego przez listowie, skapywania z rezerwuarów opadu w listowiu i topnienia śniegu. Schemat określenia sylvu powierzchniowego wykorzystuje bilans wody na powierzchni z uwzględnieniem przestrzennej zmienności opadu i zawartości wilgoci w gruncie. Bilans ten zależy od całkowitej zawartości wilgoci w gruncie i dwóch stałych określonych z ekspedycji połowych. Model NOAH uwzględnia 13 typów pokrywy roślinnej i 9 różnych typów gruntu. Model ma aż 33 parametry, z czego 23 opisuje własności gruntu, a 10 jest powiązanych z roślinnością. Wpływ zaawansowanego modelu podłoża na jakość opadów konwekcyjnych testowano dla siatek o umiarkowanej (3 km) i wysokiej (1 km) rozdzielczości.

### **WPLYW MODELU LSM NA STRUMIENIE W WARSTWIE GRANICZNEJ**

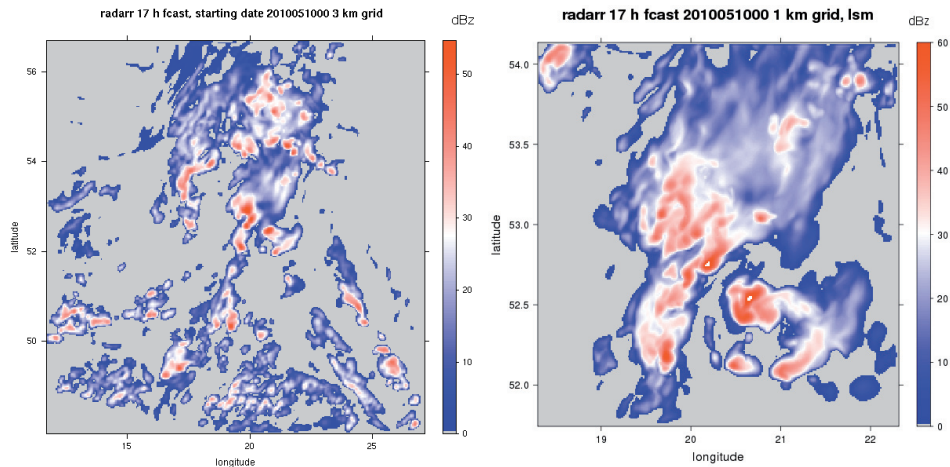
Prace różnych autorów [Pielke 2001; Taylor, Elis 2006; Jakubiak, Hodur 2010] wskazują, że niejednorodności podłoża mogą modyfikować przypowierzchniowe strumienie ciepła i wilgoci, generując cyrkulacje mezoskalową, co z kolei może prowadzić do rozwoju konwekcji. Wpływ wilgotności gruntu na położenie pól opadu jest dość trudny do jednoznacznego określenia. Duża różnorodność tej relacji wskazuje, że może ona zależeć od wielu czynników, między innymi od obszaru, zastosowanego modelu atmosfery i modelu powierzchni gruntu oraz od istniejących obiektów w skali synoptycznej. Porównanie symulowanych pól temperatury gruntu i wilgotności gruntu na poziomie -10 cm (rys. 2) z symulowanym polem odbiciowości na poziomie gruntu dla tego samego terminu (rys. 3, panel lewy) wskazuje na związki pomiędzy przestrzennym rozkładem pola opadu a obszarami o większej wilgotności gruntu. Większa wilgotność gruntu występuje w obszarach o zwiększonej odbiciowości. Wygląda na to, że silne opady burzowe pochodzenia konwekcyjnego są podstawowym źród-

dłem większej wilgotności w gruncie. Fakt ten potwierdza jednocześnie obniżenie temperatury gruntu na poziomie -10 cm w obszarach wystąpienia bardziej intensywnego opadu (jaśniejsze obszary w polu temperatury w miejscach o zwiększonej odbiciowości, Rys. 2, panel prawy).



**Rysunek 2.** Wilgotność gruntu (panel lewy) i temperatura gruntu (panel prawy) na poziomie -10 cm, 10 May 2010, 17 UTC

**Figure 2.** Soil moisture (left panel) and temperature (right panel) at -10 cm level, 10 May 2010, 17 UTC



**Rysunek 3.** Symulowana odbiciowość radaru dla siatki 3km (lewy panel) i siatki 1km (prawy panel)

**Figure 3.** Simulated radar reflectivity for medium (left panel) and fine (right panel) grids

Porównanie prognoz opadu dla dwóch zagnieżdżonych siatek o różnej rozdzielczości wskazuje dużą zgodność między rozwiązaniami dla tego samego fragmentu obszaru. Symulowana odbiciowość w obszarze siatki o wysokiej rozdzielczości (prawy panel na rys. 3) jest podobna do symulowanej odbiciowości na siatce o umiarkowanej rozdzielczości (lewy panel na rys. 3), jednocześnie ukazując większe zróżnicowanie i nieco wyższe, bardziej zbliżone do obserwowanych wartości odbiciowości.

Ilościowe oszacowania przeprowadzonych dotychczas eksperymentów wskazują na trochę lepsze wyniki konwekcyjnych prognoz opadu uzyskanych z systemu COAMPS/NOAH w porównaniu do przebiegów kontrolnych, w których model powierzchni ładu NOAH nie był używany. Do oceny jakości prognoz opadu zastosowano metodę obiektową CRA (contiguous rain area = ciągły obszar opadu) [Ebert, McBride 1999], w której zarówno w polu obserwacji, jak i w polu prognozy wyszukuje się obiekty (wartości opadu) zamknięte izohietami o określonej wartości. Następnie, metodami rozpoznawania obrazów dobiera się do obiektów obserwowanych obiekty prognozowane, a następnie określa różnice w kształcie i położeniu środków ich mas. Na podstawie tych parametrów można określić również tradycyjne statystyki, takie jak prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska czy wskaźnik fałszywego alarmu. Stosowana wersja tej metody jest w pełni zautomatyzowana, w dalszym ciągu trwają prace nad jej doskonaleniem. Wstępne wyniki [Sierżęga, Jakubiak 2008] są obiecujące, dalsze prace nad tą metodą są skierowane na rozwój algorytmów szacujących stopień przesunięcia w czasie prognozy względem obserwacji. Zaproponowana metoda jest alternatywą klasycznych metod weryfikacji wyników prognoz.

**Tabela 1.** Statystyki z przebiegów połączonego modelu COAMPS/NOAH w porównaniu z wersją operacyjną  
**Table 1.** Statistics from coupled COAMPS/NOAH runs compared to the operational version

rodzaj eksperymentu	klasa prognozy opadu	% wystąpień
COAMPS/NOAH	poprawne	49,17
	przeszacowane	13,37
	zbyt niskie	37,46
COAMPS	poprawne	45,83
	przeszacowane	18,92
	zbyt niskie	35,25

Tabela nr 1 prezentuje wyniki ilościowych oszacowań opadu uzyskane z zastosowaniem metody CRA. Wyniki pochodzą z miesięcznej próby danych. W tabeli wszystkie prognozy opadu podzielono na trzy kategorie: (1) prognozy poprawne (obserwowane i prognozowane obiekty miały podobne wartości), (2) prognozy przeszacowane (prognozowane wartości opadu były wyższe niż



obserwowane), (3) prognozy zbyt niskie (prognozowane wartości opadu były niższe niż obserwowane). We wszystkich kategoriach system COAMPS/NOAH dawał lepsze wyniki niż przebiegi kontrolne. Należy podkreślić, że liczba zbyt niskich prognoz opadu jest co najmniej dwa razy większa niż liczba prognoz przeszacowanych, co sugeruje, że model COAMPS jest zbyt suchy.

## PODSUMOWANIE

Odpowiedni podział przypowierzchniowych strumieni energii opisujących ewolucję planetarnej warstwy granicznej atmosfery w modelu numerycznych prognoz pogody wymaga dokładnego określenia początkowych i prognozowanych warunków panujących na powierzchni lądu. Wyniki eksperymentów z wprowadzeniem nowego modułu wymiany pomiędzy podłożem a atmosferą do współczesnego modelu numerycznych prognoz pogody wskazują, że tak wzbogacony model jest w stanie symulować ewolucję planetarnej warstwy granicznej na tyle dobrze, że w sensie jakościowym uzyskane wyniki prognoz są zgodne z obserwacjami. Dalsze udoskonalenia modułu wymiany pomiędzy podłożem a atmosferą będą dotyczyły asymilacji w trybie quasi operacyjnym wybranych zmiennych opisujących stan podłoża. Dodatkowo, wprowadzenie modułu NOAH umożliwia prognozy rozkładu temperatury i wilgotności w gruncie, co może być wartościowe dla zastosowań takich dziedzinach jak ogrodnictwo oraz leśnictwo.

*Pracę sfinansowano częściowo z grantu ONR NICOP N00014-09-1-1099 oraz grantu POIG 01.03.01-00-140/08. Wykorzystano zasoby obliczeniowe ICM Uniwersytetu Warszawskiego i obserwacje radarowe z Baltex Radar Data Centre, Norrköping, Szwecja.*

## BIBLIOGRAFIA

- Ebert E.E., McBride J.L. *Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors*. J. Hydrol. 239, 2000, s. 179-202.
- Ek M., Mitchell K., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno K., Trapley J. *Implementation of NOAH land surface model advances in the National Centers for Environmental Protection operational mesoscale ETA model*. J. Geophys. Res. 108, 2003, s. 8851-8866.
- Hodur R.M. *The Naval Research Laboratory Coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS)*. Mon. Wea. Rev. 125, 1997, s. 1414-1430.
- Jakubiak B., Hodur R. *Experiments with a land-surface model coupled to a high-resolution NWP system*. Proceedings of ESA ILEAPS conference "Earth Observation for Land-Atmosphere Interaction Science, Frascati, Italy, 1, 2010, s. 1-6.
- Pielke R. *Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall*. Rev. Geophys. 39, 2001, s. 151-177.

Sierzęga M., Jakubiak B., *Modified entity-based CRA method*. Proceedings of the Joint MAP D-PHASE Scientific Meeting – COST 731 mid-term seminar: Challenges in hydrometeorological forecasting in complex terrain. Bologna, Italy, 2008, s. 122-127.

Taylor C., Ellis R. *Satellite detection of soil moisture impacts on convection at the mesoscale*. Geophys. Res. Lett., 33, 2006, s. 404-407.

Dr Bogumił Jakubiak  
Uniwersytet Warszawski  
Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego  
Pawińskiego 5A, 02-106 Warszawa  
tel. 22-8749-144  
e-mail: jakubiak@icm.edu.pl

Dr Richard Hodur  
Uniwersytet Warszawski  
Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego  
Pawińskiego 5A, 02-106 Warszawa  
tel. 22-8749-144  
e-mail:  
hodur@sbcglobal.net

Recenzent: *Prof. dr hab. Leszek Łabędzki*