

УДК 338.43:631.1

**Фролов Михайло Олександрович**

*старший науковий співробітник*

*Український науково-дослідний інститут*

*спеціальної техніки та судових експертиз*

*Служби безпеки України*

**Фролов Михаил Александрович**

*старший научный сотрудник*

*Украинский научно-исследовательский институт*

*специальной техники и судебных экспертиз*

*Службы безопасности Украины*

**Frolov Mykhailo**

*Senior Research Officer*

*Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the*

*Security Service of Ukraine*

**ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ  
МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУ ПОГОДИ ДЛЯ ПОТРЕБ АГРАРНОГО  
СЕКТОРУ ЕКОНОМІКИ**

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ДЛЯ  
НУЖД АГРАРНОГО СЕКТОРА ЭКОНОМИКИ**

**PRACTICAL ASPECTS OF APPLICATION OF METEOROLOGICAL  
WEATHER PREDICTION MODELS FOR THE NEED OF  
AGRICULTURAL SECTOR OF ECONOMY**

**Анотація.** В роботі досліджено окремі аспекти застосування короткострокового і довгострокового метеорологічного прогнозування в роботі аграрних компаній різного масштабу. Системна оцінка і врахування погодних факторів у роботі аграрних компаній різного масштабу є дуже актуальною на шляху до ефективного менеджменту та підвищення прибутків, особливо за умов сучасних змін клімату. Використання існуючих глобальних метеорологічних моделей не завжди дозволяє отримати детальний і якісний прогноз для окремих територій, що є важливим для оцінки впливу погоди на посіви сільськогосподарських культур. Розглянуто переваги використання мезомасштабної моделі *Weather Research and Forecasting Model (WRF)* для аграрних компаній. Результати короткострокового і середньострокового *WRF* моделювання можуть використовуватись аграрними компаніями для оцінки потенційного негативного впливу погодних умов на сільськогосподарські культури, а також при прийнятті превентивних рішень для зменшення негативного впливу екстремальних погодних явищ на посіви та технологічні процеси вирощування сільськогосподарських культур. Проблема необхідності значних обчислювальних ресурсів для мезомасштабного моделювання можна вирішити використанням комерційних *Cloud*-платформ, які є економічно вигідніше за придбання високопродуктивних комп'ютерних систем (HPC). Запропоновано схему застосування короткострокового та середньострокового прогнозування погоди в аграрних компаніях шляхом реалізації мезомасштабного моделювання за допомогою моделі *Weather Research and Forecasting Model* із застосуванням хмарних технологій. Результатом реалізації запропонованої схеми є графічні продукти метеорологічних величин і погодні карти області моделювання (де розміщуються посіви), що є готовим продуктом для аналізу аграрними компаніями для подальшого прийняття подальших аграрно-технічних рішень.

**Ключові слова:** аграрний сектор, прогноз погоди, хмарні технології, чисельне моделювання, *Weather Research and Forecasting Model*.

**Анотація.** В работе исследованы отдельные аспекты применения краткосрочного и долгосрочного метеорологического прогнозирования в работе аграрных компаний различного масштаба. Системная оценка и учет погодных факторов в работе аграрных компаний различного масштаба является очень актуальным на пути к эффективному менеджменту и повышению доходов, особенно в условиях современных изменений климата. Использование существующих глобальных метеорологических моделей не всегда позволяет получить подробный и качественный прогноз для отдельных территорий, что важно для оценки влияния погоды на посевы сельскохозяйственных культур. Рассмотрены преимущества использования мезомасштабной модели *Weather Research and Forecasting Model (WRF)* для аграрных компаний. Результаты краткосрочного и среднесрочного *WRF* моделирования могут использоваться аграрными компаниями для оценки потенциального негативного влияния погодных условий на сельскохозяйственные культуры, а также при принятии превентивных решений для уменьшения негативного влияния экстремальных погодных явлений на посевы и технологические процессы выращивания сельскохозяйственных культур. Проблема необходимости значительных вычислительных ресурсов для мезомасштабного моделирования можно решить использованием коммерческих *Cloud*-платформ, которые являются экономически выгоднее приобретения высокопродуктивных компьютерных систем (HPC). Предложено схему применения краткосрочного и среднесрочного прогнозирования погоды в аграрных компаниях путем реализации мезомасштабных моделирования с помощью модели *Weather Research and Forecasting Model* с применением облачных технологий. Результатом

реализации предложенной схемы является графические продукты метеорологических величин и погодные карты области моделирования (где размещаются посевы), что является готовым продуктом для анализа аграрными компаниями для дальнейшего принятия дальнейших аграрно-технических решений.

**Ключевые слова:** аграрный сектор, прогноз погоды, облачные технологии, численное моделирование, Weather Research and Forecasting Model.

**Summary.** Different aspects of the application of short-term and long-term meteorological forecasting in the work of agricultural companies of different scales were investigated in this paper. Systematic assessment and consideration of weather factors in the work of agricultural companies of various scales is very important on the way to effective management and increase profits, especially in today's climate change. The use of existing global meteorological models does not always allow to obtain a detailed and qualitative forecast for individual areas, which is important for assessing the impact of weather on crops. The advantages of using the mesoscale Weather Research and Forecasting Model (WRF) for agricultural companies are considered. The results of short-term and medium-term WRF modeling can be used by agricultural campaigns to assess the potential negative impact of weather conditions on crops, as well as in preventive decisions to reduce the negative impact of extreme weather events on crops. The problem of the need for significant computing resources for mesoscale modeling can be solved by using commercial Cloud platforms, which are more cost-effective than purchasing high-performance computer systems (HPC). The scheme of application of short-term and medium-term weather forecasting in agricultural companies by realization of mesoscale modeling with Weather Research and Forecasting Model (WRF) and with application of cloud technologies was developed. The result of the proposed scheme are graphic products of

*meteorological quantities and weather maps of the modeling area (where crops are located), which is a ready product for analysis by agricultural companies for further agricultural and technical decision making process.*

***Key words:** agricultural sector, weather forecast, cloud technologies, numerical modeling, Weather Research and Forecasting Model.*

**Постановка проблеми.** Якісне забезпечення аграрного сектору короткостроковими та середньостроковими метеорологічними прогнозами є дуже важливим фактором економічної ефективності діяльності аграрних компаній будь якого масштабу і є актуальним на шляху до ефективного менеджменту та підвищення прибутків, особливо за умов сучасних змін клімату.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню тенденцій практичного застосування метеорологічних моделей для аграрного сектору і їх актуальність присвячено чимало науково-методичних праць [1–15]. Зокрема, В. І. Днесь [2] було означено значну роль якісних добових прогнозів на виконання механізованих операцій в заданих природно-виробничих умовах окремих сільгосптоваровиробників. У роботах Jones P.G [7] та Івус Г.П [1] досліджені особливості застосування сучасних глобальних метеорологічних моделей в аграрному секторі. В роботі McDermid S. [9] проаналізовано важливість застосування моделей для потреб аграрних компаній. Дослідження Zhang Z. [15] Та Liu X. [8] вказуються переваги мезомасштабного моделювання за допомогою моделі Weather Research and Forecasting Model (WRF) для потреб аграрного сектору. Проте питання практичної реалізації мезомасштабного моделювання для аграрних компаній як важливої ланки для прийняття рішень і оцінки впливу метеорологічних умов на стан посіви розглянуто недостатньо.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою даної роботи є дослідження окремих аспектів застосування короткострокового і довгострокового метеорологічного прогнозування в роботі аграрних компаній різного масштабу.

**Виклад основного матеріалу.** Зміна клімату в даний час є одним з найбільш актуальних глобальних питань. Згідно Спеціального звіту Міжурядової групи експертів з питань змін клімату 2019 року [6], сучасне збільшення загальної середньої температури поверхні відносно доіндустріальних рівнів, зсув кліматичних поясів у різних регіонах планети, деградація та ерозія родючих земель, проблеми опустелювання та дефіциту води – все це приводить до значних економічних та продовольчих збитків в глобальному масштабі. Аграрний сектор та сільське господарство є особливо вразливими до кліматичних змін, так як вирощення різноманітних сільськогосподарських культур напряду залежить від агрокліматичних умов регіонів та їх зміни.

Якісне гідрометеорологічне забезпечення аграрного сектору є дуже важливим фактором економічної ефективності діяльності аграрних компаній будь якого масштабу. Так, у роботі якісні довгострокові (1-3 місяці і більше) метеорологічні прогнози дозволяють більш ретельно планувати проведення посівних кампаній для підвищення очікуваних прибутків, а також враховувати можливі довготривалі метеорологічні ризики. В той же час, короткострокове (до 1 доби) та середньострокове (1-10 діб) прогнозування дозволяє приймати оперативні превентивні рішення щодо упередження потенційних збитків від екстремальних погодні явищ, таких як град, сильний дощ, сильний вітер, тощо [13]. Саме тому системна оцінка і врахування погодних факторів у роботі аграрних компаній різного масштабу є дуже актуальною на шляху до ефективного менеджменту та підвищення прибутків, особливо за умов сучасних змін клімату.

Сучасна система короткострокового та довгострокового прогнозування базується на використанні глобальних метеорологічних чисельних моделей прогнозу погоди, таких як Глобальна Система Прогнозування (GFS) Національного центру екологічного прогнозування NCEP (з кроком сітки 28 км), прогнози Європейського центру середньострокового прогнозування погоди ECMWF, тощо. У цих моделях розрахунки майбутнього стану атмосфери проводяться на основі математичних і фізичних принципів з використанням даних спостережень, зібраних з метеорологічних і аерологічних станцій, а також метеорологічних супутників. В той же час просторова роздільна здатність короткострокових та середньострокових прогнозів глобальних метеорологічних і кліматичних моделей не завжди є достатньою при вирішенні агрометеорологічних задач і потребує додаткової постобробки [7]. Додатково, глобальні моделі не завжди добре описують атмосферні процеси дрібних масштабів, наприклад, локальні конвективні опади, локальні заморозки, місцеві вітрові ефекти тощо [3].

Одним із найбільш поширених варіантів вирішення цих проблем глобальних моделей є використання мезомасштабних метеорологічних моделей. Такі моделі спеціально адаптуються для кожного регіону і дозволяють підвищити роздільну здатність моделювання (downscaling) та значно покращити якість прогнозування опадів та екстремальних погодних явищ [5]. Weather Research and Forecasting (WRF) модель – це мезомасштабна чисельна модель прогнозування погоди нового покоління, розроблена як для досліджень атмосфери, так і для оперативного прогнозування. Вона має два динамічні ядра, систему асиміляції даних спостережень та спеціально розроблену архітектуру програмного забезпечення, що підтримує паралельні обчислення [12]. Результати короткострокового і середньострокового WRF моделювання можуть використовуватись аграрними компаніями для оцінки потенційного

негативного впливу погодних умов на сільськогосподарські культури, а також при прийнятті превентивних рішень для зменшення негативного впливу екстремальних погодних явищ на посіви та технологічні процеси вирощування сільськогосподарських культур.

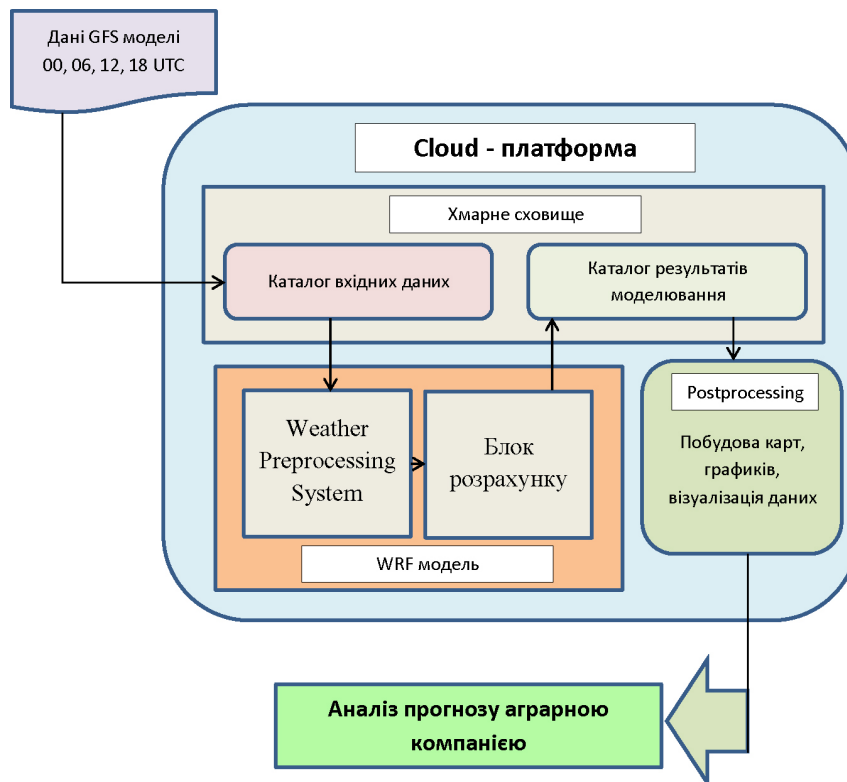
Основними перевагами використання WRF моделі для підприємств аграрного сектору є наступні: 1) можливість точної настройки моделі для відповідного регіону моделювання і її масштабування; 2) модель є відкритою для використання і має велику спільноту зареєстрованих користувачів; 3) постійна технічна підтримка від розробників, а також постійна оптимізація і оновлення версій моделі; 4) модель не потребує дуже складних технічних рішень для імплементації – лише первинна настройка, наявність високопродуктивного серверу та інтернет з'єднання для загрузки вхідних граничних даних для моделювання; 5) наявність великої кількості результатів досліджень з використанням даної моделі, в тому числі і в аграрному секторі.

В той же час, ефективне мезомасштабне чисельне моделювання з високим ступенем деталізації (до 100 метрів і менше) можливо лише на високопродуктивних комп'ютерних системах (High Performance Computing systems - HPC). Закупівля і підтримка HPC систем потребують значних грошових інвестицій [11]. Одним із шляхів вирішення цього питання є використання комерційних Cloud-платформ (наприклад Google Cloud Platform (GCP), Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, тощо) замість придбання фізичних HPC систем. Cloud-платформи – це віддалені серверні системи, зокрема сховища даних та обчислювальної потужності, якими користувач управляє за допомогою технології віддаленого доступу (remote access). У роботах [4] та [14] було показано, що ефективність моделювання на Cloud-платформах не сильно поступається HPC системам і дає змогу значно зменшити витрати на необхідне обладнання.



Основними перевагами використання Cloud-платформ над HPC системами є: 1) заощадження витрат на електроенергію та персонал, так як всі поточні витрати здійснює компанія, яка надає хмарні послуги; 2) можливість повної автоматизації процесу моделювання, збереження даних та обробки розрахунків; 3) постійний доступ до результатів моделювання через мережу Інтернет.

На основі наведеного вище аналізу, пропонується наступна схема застосування короткострокового та середньострокового прогнозування погоди в аграрних компаніях шляхом реалізації WRF моделювання із застосуванням хмарних технологій (Рис. 1)



**Рис. 1. Схема реалізації короткострокового та середньострокового прогнозування погоди в аграрних компаніях**

*Джерело:* складено автором

За запропонованою схемою, аграрна компанія орендує місце на комерційній Cloud-платформі. Розмір орендованих потужностей залежить від місця розміщення посівів. Інсталяція WRF моделі (бажано найбільш

актуальної версії на момент реалізації) виконується на операційних системах Linux, Ubuntu або CentOS. Для ефективного використання апаратних ресурсів хмарного серверу, рекомендується компіляція моделі з сукупною опцією підтримки використання спільної пам'яті OpenMP та паралелізації розподіленої пам'яті MPI.

В якості вхідних даних для моделювання пропонується використовувати дані GFS моделі за 00, 06, 12 та 18 UTC з ftp-серверу продуктів NCEP, які розповсюджуються у відкритому доступі [10]. Прогноз охоплює наступні 10 діб з часовою дискретністю у 3 години та просторовою роздільною здатністю 0,25 градуси. За допомогою скриптів на довільній мові програмування (Python, NCL, Shell), оновлені файли прогнозу у форматі grib завантажуються на хмарне сховище відповідно до періодичності їх оновлення на ftp-сервері NCEP [11]. За допомогою системних команд, проводиться настройка автоматичного запуску WRF моделі після кожного завантаження даних. В подальшому за допомогою додаткових підпрограм метеорологічні дані обробляються модельним блоком Weather Preprocessing System (WPS) і проводиться автоматизований запуск розрахункового блоку ВРФ моделі.

Результуючі файли прогнозу обробляються за допомогою скриптів Python та NCL (Postprocessing), а саме: будуються карти області моделювання, виводяться дані основних метеорологічних параметрів (температура, тиск, температура точки роси, вологість, швидкість вітру, інтенсивність опадів, тощо) в обраних координатах розташування посівних площ, тощо. Отримані графіки і карти є готовим продуктом для аналізу аграрними компаніями для прийняття подальших аграрно-технічних рішень.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.** Таким чином, в роботі було досліджено можливість застосування мезомасштабних метеорологічних моделей для

аграрних компаній різного масштабу. Використання існуючих глобальних метеорологічних моделей не завжди дозволяє отримати детальний і якісний прогноз для окремих територій, що є важливим для оцінки впливу погоди на посіви сільськогосподарських культур. Оптимальний шляхом вирішення цієї проблеми є мезомасштабне моделювання, яке дозволяє значно підвищити деталізацію прогнозів. Використання відкритої мезомасштабної моделі WRF дозволяє отримати більш якісний короткостроковий та довгостроковий прогнози погоди і масштабувати роздільну здатність області моделювання до 100 метрів і менше. В той же час проблема необхідності значних обчислювальних ресурсів сьогодні вирішується використанням комерційних Cloud-платформ, які є економічно вигідніше за придбання НРС систем. На основі проведеного аналізу була запропонована схема застосування короткострокового та середньострокового прогнозування погоди в аграрних компаніях шляхом реалізації WRF моделювання із застосуванням хмарних технологій. Результатом реалізації запропонованої схеми є графічні продукти метеорологічних величин і погодні карти області моделювання (де розміщуються посіви), що є готовим продуктом для аналізу аграрними компаніями для подальшого прийняття подальших аграрно-технічних рішень.

### **Література**

1. Івус Г.П. Практикум зі спеціалізованих прогнозів погоди. Навч. посібник. Одеса: Екологія, 2007. 328 с.
2. Днесь В.І. Передумови моделювання виникнення предметно-агrometeorological подій в технологічних процесах вирощування зернових культур / В. І. Днесь, В. І. Скібчик, Р. Б. Кудринський, О. М. Сіваковська // Механізація та електрифікація сільського господарства. 2018. Вип. 8. С. 219-231.

3. Chen Z., Liping D., Li L., L. G. Machine-learned prediction of annual crop planting in the U.S. Corn Belt based on historical crop planting maps // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. doi: 10.1016/j.compag.2019.104989, 166, (104989).
4. Chui T. C. Y., Siuta D., West G., Modzelewski H., Schigas R., Stull R. On Producing Reliable and Affordable Numerical Weather Forecasts on Public Cloud-Computing Infrastructure // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019. 36(3). PP. 491-509.
5. Daabeck J. Overview of Meteorological Workstation Development in Europe // *21st International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology*. 2005.
6. IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
7. Jones P.G, Thornton P.K. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications // *Agricultural Systems*, 2013. 114. PP. 1-5.
8. Liu X., Chen F., Barlage M., Zhou G., and Niyogi D. Noah-MP-Crop: Introducing dynamic crop growth in the Noah-MP land surface model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016. 121, 13. PP. 953–13, 972. doi: 10.1002/2016JD025597
9. McDermid S. S., Mearns L. O., Ruane A. C. Representing agriculture in Earth System Models: Approaches and priorities for development, *Journal*

- of *Advances in Modeling Earth Systems*, 2017. doi: 10.1002/2016MS000749, 9, 5, (2230-2265).
10. NCAR. URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>
11. Siuta D., West G., Modzelewski H., Schigas R., Stull R. Viability of Cloud Computing for Real-Time Numerical Weather Prediction, *Weather and Forecasting*, 2016. 31(6). PP. 1985-1996.
12. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Duda M. G., Barker D., Hung X.-yu. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4, 2019. (No. NCAR/TN-556+STR). doi: 10.5065/1dfh-6p97
13. World Bank. 2015. *Agricultural Risk Management in the Face of Climate Change*. Washington, DC. © World Bank. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22897> License: CC BY 3.0 IGO
14. Yuan M. Conclusion and the road ahead. *Cloud Computing in Ocean and Atmospheric Sciences*, T. C. Vance et al., Eds., Academic Press, 2016. PP. 385–391. doi: 10.1016/B978-0-12-803192-6.00020-7
15. Zhang Z., Barlage M., Chen F., Li Y, Helgason W., Xu. X., Liu X., Li Z. Joint Modeling of Crop and Irrigation in the central United States Using the Noah-MP Land Surface Model // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020. doi: 10.1029/2020MS002159, 12, 7.

### **References**

1. Ivus Gh.P. *Praktykum zi specializovanykh proghnoziv poghody. Navch. posibnyk*. Odesa: Ekologhija, 2007. 328 s.
2. Dnesj V.I. *Peredumovy modeljuvannja vynyknennja predmetno-aghrometeorologhichnykh podij v tekhnologhichnykh procesakh vyroshhuvannja zernovykh kuljtur* / V. I. Dnesj, V. I. Skibchyk, R. B.

- Kudryncjkyj, O. M. Sivakovsjka // *Mekhanizacija ta elektryfikacija siljsjkogho ghospodarstva*. 2018. Vyp. 8. S. 219-231.
3. Chen Z., Liping D., Li L., L. G. Machine-learned prediction of annual crop planting in the U.S. Corn Belt based on historical crop planting maps // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. doi: 10.1016/j.compag.2019.104989, 166, (104989).
  4. Chui T. C. Y., Siuta D., West G., Modzelewski H., Schigas R., Stull R. On Producing Reliable and Affordable Numerical Weather Forecasts on Public Cloud-Computing Infrastructure // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019. 36(3). PP. 491-509.
  5. Daabeck J. Overview of Meteorological Workstation Development in Europe // *21st International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology*. 2005.
  6. IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
  7. Jones P.G, Thornton P.K. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications // *Agricultural Systems*, 2013. 114. PP. 1-5.
  8. Liu X., Chen F., Barlage M., Zhou G., and Niyogi D. Noah-MP-Crop: Introducing dynamic crop growth in the Noah-MP land surface model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016. 121, 13. PP. 953–13, 972. doi: 10.1002/2016JD025597

9. McDermid S. S., Mearns L. O., Ruane A. C. Representing agriculture in Earth System Models: Approaches and priorities for development, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2017. doi: 10.1002/2016MS000749, 9, 5, (2230-2265).
10. NCAR. URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>
11. Siuta D., West G., Modzelewski H., Schigas R., Stull R. Viability of Cloud Computing for Real-Time Numerical Weather Prediction, *Weather and Forecasting*, 2016. 31(6). PP. 1985-1996.
12. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Duda M. G., Barker D., Hung X.-yu. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4, 2019. (No. NCAR/TN-556+STR). doi: 10.5065/1dfh-6p97
13. World Bank. 2015. *Agricultural Risk Management in the Face of Climate Change*. Washington, DC. © World Bank. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22897> License: CC BY 3.0 IGO
14. Yuan M. Conclusion and the road ahead. *Cloud Computing in Ocean and Atmospheric Sciences*, T. C. Vance et al., Eds., Academic Press, 2016. PP. 385–391. doi: 10.1016/B978-0-12-803192-6.00020-7
15. Zhang Z., Barlage M., Chen F., Li Y, Helgason W., Xu. X., Liu X., Li Z. Joint Modeling of Crop and Irrigation in the central United States Using the Noah-MP Land Surface Model // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020. doi: 10.1029/2020MS002159, 12, 7.