

Б.В. Молодець, Т.М. Булана, Д.О. Болдирєв

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ ПОГОДНИХ УМОВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Анотація: Робота присвячена розробці інформаційної технології моделювання погоди, застосуванням глибокого навчання в задачах прогнозування атмосферних явищ. В якості моделі було обрано FourCastNet з високоефективною обробкою геофізичних даних, яка дала можливість навчатися на великих масивах історичної метеорологічної інформації та забезпечила оперативне прогнозування з високою просторовою роздільною здатністю. В якості джерела початкових умов було обрано модель GFS з асиміляцією GDAS, які надають дані з роздільною здатністю $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (~28 км). Це дозволило отримати кращу деталізацію атмосферних процесів та забезпечити можливість використання системи в режимі реального часу та подолати обмеження базової роздільної здатності моделей типу ERA5 (приблизно 31 км). Для адаптації глобальних прогнозів з урахуванням геопросторових параметрів було використано модифіковану архітектуру типу UNet, яка виконує просторову інтерполяцію на основі інформації з найближчих метеостанцій. В статті детально розглянуто архітектуру створеної інформаційної системи прогнозування. Запропонований підхід збільшує точність прогнозування для окремих точок, що є особливо актуальним для аграрного планування та роботи систем раннього оповіщення.

Ключові слова: інформаційна система, прогнозування атмосферних явищ, обробка метеорологічних даних, нейронні мережі, UNet архітектура, модель FourCastNet

Постановк проблеми. У сучасному світі, де зростає частота екстремальних погодних явищ та ускладнюється вплив кліматичних змін на соціально-економічні процеси, виникає нагальна потреба в оперативному та точному прогнозуванні атмосферних умов. На сьогоднішній день усі методи передбачення погодних умов можна умовно розділити на дві групи - це традиційні чисельні методи моделювання, та методи засновані на штучному інтелекті. Моделювання погоди особливе значення для наступних шарів населення: метеорологів, аграріїв, працівників служб надзвичайних ситуацій, транспортних компаній, енергетиків, а також дослідників у сфері кліматології та екології. Для фермерів це дозволяє планувати сільськогосподарські роботи з урахуванням погодних умов, а для авіа- та морських перевізників — забезпечувати безпечну логістику. Урядові структури та служби цивільного захисту можуть використовувати прогнози для підготовки до стихійних лих, мінімізуючи потенційні збитки та рятуючи

людські життя. Крім того, високоточне моделювання погоди є критичним для довгострокового моніторингу кліматичних змін і формування екологічної політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В статті [1] розглядається спроектована система прогнозування на основі штучного інтелекту (AIFS) – модель прогнозування на основі даних, розроблена Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF). Модель має модульну архітектуру та підтримує паралельне навчання на високоточних даних. Її прогнози оцінюються порівнянням з NWP-аналізом і спостереженнями, демонструючи високу точність для атмосферних змінних, погодних параметрів на поверхні та треків циклонів. Система запускається чотири рази на день разом із моделлю ECMWF, а результати доступні публічно.

В статті [2] проаналізовано інтеграцію штучного інтелекту з чисельними моделями прогнозування погоди на різних етапах моделювання. Розглянуто сучасні архітектури, такі як RNN, CNN, LSTM, MetNet, FourCastNet і GraphCast, які здатні працювати з високою просторовою роздільною здатністю та фокусуватися на окремих атмосферних явищах. Перелічені моделі демонструють потенціал у підвищенні точності прогнозів, однак на сьогодні вони переважно використовуються як допоміжні інструменти — для обробки, асиміляції та підготовки даних. Це дозволяє покращувати роботу традиційних моделей прогнозування (базуються на фізичних рівняннях), та оминати обмеження прогнозування в режимі реального часу. І хоча традиційні моделі можуть показувати кращий результат на великих територіях моделювання, для моделювання погоди на невеликих територіях, нейронні мережі можуть показувати кращий результат завдяки покращенню вхідних даних [3], а саме: збільшення роздільної здатності вхідних параметрів, таких як рельєф та історичні стаціонарні дані.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає в розробці ефективної інформаційної технології для прогнозування атмосферних явищ шляхом інтеграції сучасних моделей глибокого навчання, зокрема FourCastNet та модифікованої архітектури UNet, з глобальними метеорологічними даними (GFS з асиміляцією GDAS) з метою підвищення точності, швидкодії та локальної адаптації прогнозів у режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі у якості моделі з моделювання глобальних даних було обрано модель FourCastNet [4]. Ця модель прогнозування погоди, заснована на методах глибокого навчання, розроблена дослідниками з NVIDIA та спільно з вченими з ряду університетів. Вона поєднує нейронні мережі з архітектурою трансформерів та спеціально адаптованими обчислювальними блоками для обробки геофізичних даних. Модель навчається на великих обсягах історичних метеорологічних даних (наприклад, з ERA5) і здатна здійснювати прогнозування погоди з високою просторовою роздільною здатністю — до 0.25° — у сотні разів швидше, ніж традиційні чисельні методи, при цьому зберігаючи порівняну точність.

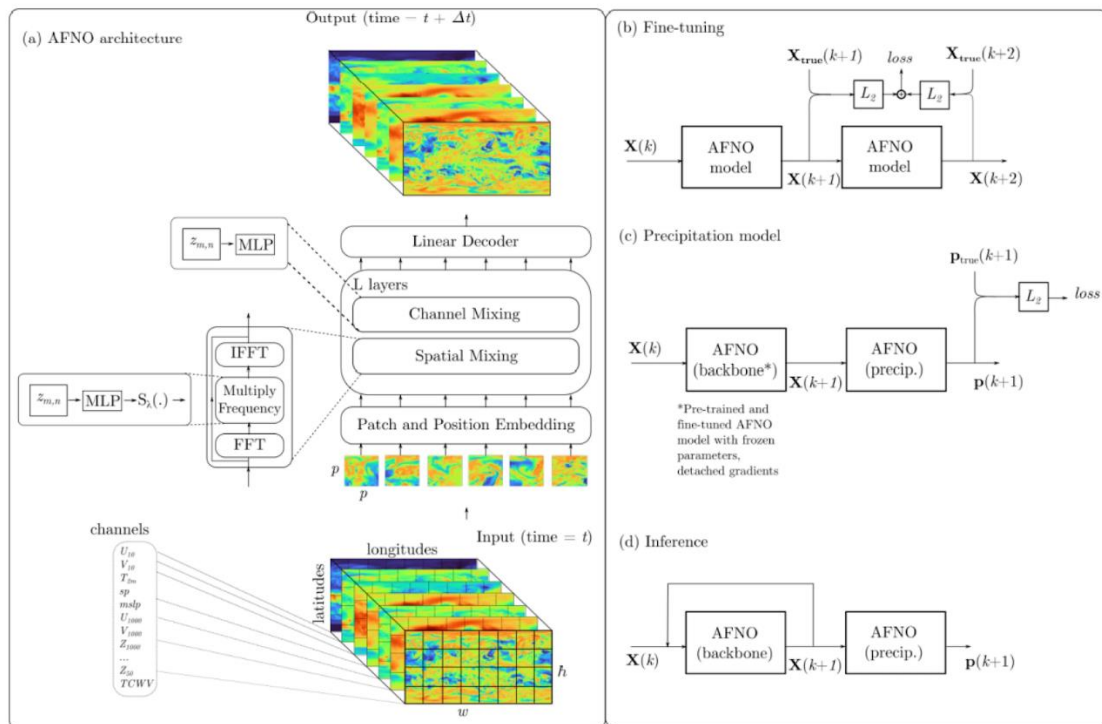


Рисунок 1 - Схема моделі FourCastNet [4]

FourCastNet демонструє вражаючу продуктивність завдяки ефективному використанню GPU-архітектури, що дозволяє здійснювати глобальні прогнози погоди всього за кілька секунд. Це відкриває нові можливості для оперативного реагування на погодні зміни, а також дає змогу створювати ансамблеві прогнози в реальному часі. Завдяки своїй гнучкості та швидкості модель має великий потенціал для інтеграції в системи раннього попередження, а також для використання в мобільних додатках, агросекторі та енергетичному плануванні [5].

Загальна схема роботи моделі з погодними зображена на рисунку 2.

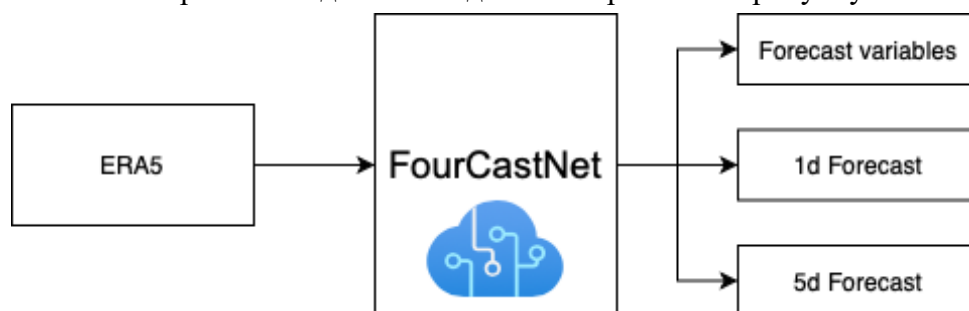


Рисунок 2 - Принцип роботи моделі на основі даних ERA5

Для навчання спочатку було обрано датасет [6]. На основі даних ERA5 було проведено моделювання та порівняння отриманих даних, а саме значення температури із даними замірів реальної станції впродовж місяця. RMSE двох часових рядів склало 3 градуси за цельсієм.

Дані моделі ERA5 мають роздільну здатність ~ 31 км, а надання цих даних відбувається із затримкою відносно поточного часу, оскільки необхідний час на обробку да-

них із земних станцій. З метою поліпшення роздільної здатності базових даних, а також можливості використання прогнозування у реальному часі глобальну модель було змінено на модель GFS, для навчання використано її версію з асиміляцією даних GDAS [7].

Модель GDAS (Global Data Assimilation System) — це глобальна система збору, обробки та аналізу метеорологічних даних, яка використовується для створення початкових умов для чисельного прогнозування погоди, зокрема для моделі GFS. Вона поєднує дані з наземних станцій, супутників, радарів та інших джерел, забезпечуючи максимально точну початкову картину атмосфери. Роздільна здатність GDAS зазвичай становить близько $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (приблизно 28 км на екваторі), що дозволяє моделі охоплювати глобальні процеси з достатньо високою деталізацією для оперативного прогнозування.

Навчальна та тренувальна вибірки були створені з набору даних, що зберігається у s3 сховищі [8]. Для навчання було обрано період проміжком 10 останніх років.

Після навчання RMSE змодельованих даних та температурних показників зі станції склало 2 градуси, що поліпшує початковий результат та дає змогу прогнозувати дані у режимі реального часу.

Для покращення глобальної моделі GFS було розроблено парсер повірених станцій моніторингу погоди, це дає змогу доповнювати дані моделі на основі локальних замірів та заносити ці зміни під час розрахунків моделі FourCastNet.

На основі моделі UNet [9] було розроблено алгоритм з інтерполяції глобальних даних для покращення якості прогнозу для конкретного користувача. Цей підхід здійснює інтерполяцію ітеративно, поступово "захоплюючи" відсутні значення з країв до центру. На кожному кроці обчислення охоплюють лише ті пікселі з пропущеними значеннями, які оточені певною кількістю валідних сусідніх пікселів — спочатку восьми, з подальшим зменшенням цієї кількості до трьох. Після досягнення порогу в три сусіди, інтерполяція продовжується доти, поки всі пропуски не буде заповнено.

Метод ефективно справляється як із поодинокими "островами" пропусків, так і з великими блоками, в яких центральні пікселі оточені виключно відсутніми значеннями. Завдяки обробці зовнішніх шарів даних із максимальною кількістю сусідніх валідних значень, Процес інтерполяції стартує з шостого циклу, коли кількість валідних сусідів зменшується до трьох, і триває до повного зникнення пропущеного блоку. Такий підхід дозволяє досягти високої точності заповнення з мінімальними обчислювальними витратами.

Схема інформаційної системи демонструє в інтеграцію глобальної моделі моделі FourCastNet, яка використовує дані з GFS з асиміляцією GDAS як початкові умови, з модулем просторової інтерполяції на основі модифікованої архітектури UNet. У системі також враховано дані з локальних метеостанцій, що забезпечує додаткове уточнення прогнозу. Завдяки цьому архітектура орієнтована на оперативне отримання високоточних прогнозів у реальному часі, що є особливо актуальним для мобільних додатків, аграрного планування та систем раннього попередження про стихійні явища.

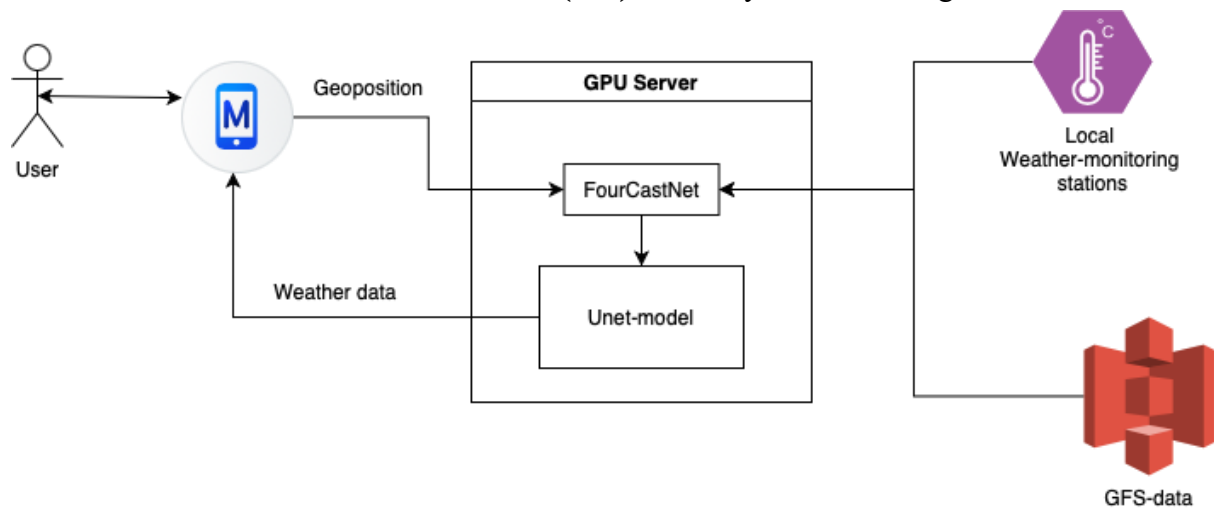


Рисунок 3 - Схема інформаційної системи

Користувач взаємодіє з системою через клієнтський застосунок (мобільний додаток чи веб застосунок). Комунікація відбувається шляхом передачі географічних координат в системі WGS 84 / Pseudo-Mercator EPSG:3857 через API Gateway на GPU server, де проводиться обробка погодних даних. Після отримання координат система в асинхронному режимі запускає операцію прогнозування погоди, яка використовує глобальні метеорологічні данні. Після цього результат адаптується глобальний прогноз до локальних умов, враховуючи геопозицію користувача та дані з місцевих метеостанцій. Після завершення постобробки - дані в зручному форматі повертаються користувачу.

Висновки. В результаті досліджень було отримано інструмент прогнозування погоди в режимі реального часу з використання комбінації моделі глобального прогнозування FourCastNet та постропроцесінгу з використанням моделі Unet, для локалізації отриманого прогнозування та збільшення розподільної здатності прогнозу. В результаті експериментів було отримано середньоквадратичну похибку у 2 градуси, що дає змогу прогнозувати дані у режимі реального часу з відносно малим відхиленням. В результаті роботи було створено інформаційну систему з використанням для взаємодії з користувачем. Система також може бути імплементована як підмодуль існуючої системи моніторингу [10] якості повітря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lang S., Alexe M., Chantry M., Dramsch J. S., Pinault F., Raoult B. et al. (2024). AIFS - ECMWF's data-driven forecasting system. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.01465>
2. Waqas M., Humphries U. W., Chueasa B., Wangwongchai A. (2024). Artificial intelligence and numerical weather prediction models: A technical survey, *Natural Hazards Research*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.11.004>
3. Shabnam Kumari, P Muthulakshmi. (2023). Weather Prediction Using Futuristic Technologies: From Industry's Perspective. In *Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing (IC3-2023)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1145/3607947.3607994>

4. Pathak J., Subramanian S., Harrington P., Raja S., Chattopadhyay A., Mardani M., et al. (2022) FourCastNet: A Global Data-driven Weather Model using Deep Learning, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11214>
5. NVIDIA. FourCastNet – Forecasting Global Weather with Neural Operators [Електронний ресурс] // NVIDIA Documentation. – Режим доступу: https://docs.nvidia.com/deeplearning/physicsnemo/physicsnemo-sym/user_guide/neural_operators/fourcastnet.html.
6. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. (2020). Weather-Bench: A benchmark data set for data-driven weather forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, DOI: <https://doi.org/10.1029/2020MS002203>
7. National Center for Atmospheric Research. ERA5 Atmospheric Reanalysis [Електронний ресурс] // Climate Data Guide. – Режим доступу: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era5-atmospheric-reanalysis>.
8. Amazon Web Services. NOAA Global Forecast System (GFS) [Електронний ресурс] // Registry of Open Data on AWS. – Режим доступу: <https://registry.opendata.aws/noaa-gfs-bdp-pds/>. – Назва з екрана.
9. Wang, J. (2024) Data interpolation methods with the UNet-based model for weather forecast. *International Journal of Data Science and Analytics*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00611-z>
10. Molodets, B., Hnatushenko Volodymyr, Boldyriev D., Bulana T. Information System of Air Quality Assessment Based of Ground Stations and Meteorological Data Monitoring. *CEUR Workshop Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2023)*. 2023.Vol. 3373, P. 206–216.

REFERENCES

1. Lang S., Alexe M., Chantry M., Dramsch J. S., Pinault F., Raoult B. et al. (2024). AIFS - ECMWF's data-driven forecasting system. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.01465>
2. Waqas M., Humphries U. W., Chueasa B., Wangwongchai A. (2024). Artificial intelligence and numerical weather prediction models: A technical survey, *Natural Hazards Research*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.11.004>
3. Shabnam Kumari, P Muthulakshmi. (2023). Weather Prediction Using Futuristic Technologies: From Industry's Perspective. In *Proceedings of the 2023 Fifteenth International Conference on Contemporary Computing (IC3-2023)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.1145/3607947.3607994>
4. Pathak J., Subramanian S., Harrington P., Raja S., Chattopadhyay A., Mardani M., et al. (2022) FourCastNet: A Global Data-driven Weather Model using Deep Learning, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11214>
5. NVIDIA. FourCastNet – Forecasting Global Weather with Neural Operators [NVIDIA Documentation.] Retrieved from https://docs.nvidia.com/deeplearning/physicsnemo/physicsnemo-sym/user_guide/neural_operators/fourcastnet.html.

6. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. (2020). Weather-Bench: A benchmark data set for data-driven weather forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, DOI: <https://doi.org/10.1029/2020MS002203>
7. National Center for Atmospheric Research. ERA5 Atmospheric Reanalysis [Climate Data Guide] Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era5-atmospheric-reanalysis>.
8. Amazon Web Services. NOAA Global Forecast System (GFS) [Registry of Open Data on AWS] Retrieved from <https://registry.opendata.aws/noaa-gfs-bdp-pds/>.
9. Wang, J. (2024) Data interpolation methods with the UNet-based model for weather forecast. *International Journal of Data Science and Analytics*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00611-z>
10. Molodets, B., Hnatushenko Volodymyr, Boldyriev D., Bulana T. Information System of Air Quality Assessment Based of Ground Stations and Meteorological Data Monitoring. *CEUR Workshop Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2023)*. 2023.Vol. 3373, P. 206–216. Mode of access: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/>

Received 02.05.2025.
Accepted 13.05.2025.

Analysis of existing architectures for the development of an information system of air quality assessment

The paper focuses on the development of information technology for weather modeling and forecasting using modern deep learning methods. The relevance of the topic is driven by growing climate risks, an increase in the frequency of extreme weather events, and the need for highly accurate meteorological analytics for the agricultural sector, transportation, energy, and civil defense systems. FourCastNet, a modern architecture based on deep neural networks and transformers that combines high performance with the ability to process large-scale historical meteorological data, was chosen as the main model for generating forecasts. FourCastNet was trained on data from global atmospheric analysis, which ensured forecasting accuracy at the same level with traditional numerical models at a much lower computational load.

To form the initial forecasting conditions, data from the GFS global numerical model in combination with the GDAS assimilation system were used. These sources provide weather data with a resolution of approximately $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (~28 km), which made it possible to overcome the limitations of ERA5-type models (about 31 km) and make the system suitable for real-time use. In order to adapt the global forecast to a specific geographic location, a spatial interpolation approach was implemented using a modified UNet architecture. This model refines meteorological parameters based on data from local weather stations, thus improving the accuracy of forecasts at specific locations.

The article describes in detail the architecture of the information system, which includes modules for processing input data, forecasting models, an interpolation system, and an end-user interface. The proposed solution makes it possible to obtain highly accurate forecasts in an online mode, which is especially important for decision-making in critical industries. Particular attention is paid to the possibility of integrating the system into mobile applications and real-time notification platforms.

Keywords: information system, forecasting of atmospheric processes, meteorological data processing, neural networks, UNet architecture, FourCastNet model

Молодець Богдан Володимирович – доцент кафедри інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії, доктор філософії в галузі інформаційних технологій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Булана Тетяна Михайлівна – доцент кафедри інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії, кандидат технічних наук, Національний Технічний Університет «Дніпровська політехніка».

Болдирєв Даниїл Олександрович – аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Molodets Bohdan – Associate Professor of the Department of information technology and computer engineering, Ph.D. in Software Engineering, Dnipro University of Technology.

Bulana Tetiana – Associate Professor of the Department of information technology and computer engineering, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Dnipro University of Technology.

Boldyriev Daniil – Postgraduate Student, Dnipro University of Technology.