

ЗАСТОСУВАННЯ LSTM ТА CNN МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВОДИ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто застосування глибоких нейронних мереж типу LSTM (Long Short-Term Memory) та CNN (Convolutional Neural Network) для прогнозування багатопараметричних показників якості води в режимі реального часу. Проаналізовано архітектурні особливості рекурентних мереж з елементами пам'яті, зокрема механізм керування потоком інформації через ворота забування, вхідні та вихідні ворота. Розглянуто принципи побудови гібридних CNN-LSTM моделей, у яких згорткові шари відповідають за виділення локальних просторових ознак часових рядів, а LSTM шари – за врахування довготривалих часових залежностей. Обґрунтовано доцільність використання таких гібридних моделей для підвищення точності прогнозування комплексного інтегрального показника якості води на основі багатопараметричних Big Data-моделей.

Ключові слова: LSTM, CNN, машинне навчання, прогнозування часових рядів, якість води, гібридні моделі, Big Data, моніторинг у реальному часі.

Abstract

The paper examines the application of deep neural networks, namely LSTM (Long Short-Term Memory) and CNN (Convolutional Neural Network), for forecasting multiparametric water quality indicators in real time. The architectural features of recurrent networks with memory elements are analyzed, including the mechanism of controlling information flow through forget, input, and output gates. The principles of constructing hybrid CNN-LSTM models are considered, in which convolutional layers extract local spatial features of time series while LSTM layers capture long-term temporal dependencies. The feasibility of using such hybrid models to improve the accuracy of forecasting an integral complex water quality indicator based on multiparametric Big Data models is justified.

Keywords: LSTM, CNN, machine learning, time series forecasting, water quality, hybrid models, Big Data, real-time monitoring.

Вступ

Прогнозування змін показників якості води є невід'ємною складовою сучасних систем інтелектуального моніторингу водних ресурсів. На відміну від простого реєстрування поточних значень фізико-хімічних параметрів, завдання прогнозування дозволяє завчасно виявляти тенденції до погіршення якості води та приймати превентивні управлінські рішення. Оскільки дані, що надходять із сенсорних мереж, мають характер багатовимірних часових рядів зі складними нелінійними залежностями між параметрами, традиційні статистичні методи прогнозування часто виявляються недостатньо точними. Водночас поєднання алгоритмів машинного навчання із сучасними сенсорними технологіями дозволяє ефективно відстежувати стан водних ресурсів, виявляти приховані закономірності у великих масивах даних про якість води та завчасно прогнозувати ймовірні загрози її забруднення [1].

Метою даного дослідження є аналіз можливостей застосування моделей глибокого навчання LSTM та CNN, а також їх гібридних архітектур для прогнозування багатопараметричних показників якості води, що формуються на основі Big Data-моделей у системах моніторингу реального часу.

LSTM та CNN моделі для прогнозування показників якості води

Рекурентні нейронні мережі архітектури LSTM є одним із найбільш ефективних інструментів для аналізу часових рядів водної якості, оскільки здатні зберігати інформацію про довготривалі залежності між послідовними вимірюваннями завдяки механізму рекурентної обробки, що враховує довготривалі характеристики часозалежних даних [2]. Базовий елемент LSTM мережі – це комірка пам'яті, керована трьома воротами. Ворота забування визначають частку попередньої інформації, яка зберігається:

$$f_1 = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f),$$

де f_t – вектор забування, h_{t-1} – попередній прихований стан, x_t – поточний вхідний вектор параметрів (температура, рН, розчинений кисень, залишковий хлор, мінералізація), W_f , b_f – навчальні параметри.

Вхідні ворота та кандидат на оновлення стану комірки обчислюються як:

$$i_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f), \tilde{c}_t = \tan(W_c * [h_{t-1}, x_t] + b_c),$$

а стан комірки оновлюється за формулою:

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * \tilde{c}_t,$$

Вихідні ворота та прихований стан мережі визначаються як:

$$o_t = \sigma(W_o * [h_{t-1}, x_t] + b_o), h_t = o_t * \tan(c_t).$$

Така архітектура дозволяє ефективно вирішувати проблему зникнення градієнта, властиву звичайним рекурентним мережам, і зберігати релевантну інформацію про попередні стани водної системи на значному часовому горизонті.

Згорткові нейронні мережі (CNN), на відміну від LSTM, орієнтовані на виявлення локальних просторово-часових закономірностей у вхідних даних завдяки здатності ефективно витягувати ознаки з багатовимірних даних, таких як часові ряди [3]. Одновимірний згортка для часового ряду параметрів якості води обчислюється як:

$$y_i = \sum W_k * X_{i+k} + b,$$

де y_i – вихідна ознака, W_k – ядро згортки розміром K , X_{i+k} – вхідне значення параметра у момент $i + k$, b – зсув.

Поєднання обох архітектур у гібридній CNN-LSTM моделі дозволяє використовувати переваги кожної з них. Як показують дослідження гібридних підходів до прогнозування часових рядів, комбінування різнорідних моделей забезпечує багаторівневий аналіз даних, за якого статистичні методи описують основні тренди й сезонність, а глибокі нейронні мережі опрацьовують нелінійні та короткострокові залежності, що дає змогу враховувати складні закономірності, які не завжди можуть бути повністю охоплені однією моделлю [4]. CNN застосовується для виділення ознак довгих часових рядів, а LSTM – для довгострокового прогнозування [5]. Емпіричні дослідження підтверджують ефективність такого підходу, для прогнозування концентрації розчиненого кисню гібридна модель CNN-LSTM продемонструвала коефіцієнт детермінації R^2 на рівні 0,9922 порівняно з 0,9814 для окремої LSTM моделі та значно нижчими показниками для класичних моделей MLP та XGBoost, де введення згорткової мережі суттєво покращило точність порівняно з окремою LSTM [3].

Для застосування у задачах комплексного оцінювання якості води на основі багатопараметричних Big Data-моделей доцільно розглядати LSTM та CNN-LSTM не як засоби прогнозування окремих параметрів, а як компонент єдиної моделі прогнозування інтегрального показника якості води (Water Quality Index), що агрегує температуру, рН, концентрацію розчиненого кисню, рівень залишкового хлору та загальну мінералізацію в єдиний часовий ряд. Дослідження, присвячені багатовимірному прогнозуванню ключових показників, підтверджують, що інтерпретовані LSTM моделі забезпечують достатньо високу точність, середній коефіцієнт детермінації для загального азоту та розчиненого кисню досягав 0,82 та 0,86 відповідно [6]. Подальший розвиток таких моделей пов'язаний із застосуванням механізмів уваги, які дозволяють виділяти найбільш інформативні часові інтервали, що демонструється покращенням показників RMSE та R^2 порівняно з базовою LSTM моделлю [5].

Висновки

У роботі проаналізовано архітектурні особливості LSTM та CNN моделей глибинного навчання для прогнозування багатопараметричних показників якості води в режимі реального часу. Показано, що LSTM мережі завдяки механізму керування воріт ефективно враховують довготривалі часові залежності, тоді як CNN шари забезпечують виділення локальних ознак часових рядів. Встановлено, що гібридні CNN-LSTM архітектури демонструють вищу точність прогнозування порівняно з окремими моделями, що підтверджується результатами проаналізованих досліджень. Застосування таких моделей у складі засобу комплексного оцінювання якості води на основі багатопараметричних Big Data-моделей дозволить завчасно виявляти тенденції погіршення якості водних ресурсів та підвищити оперативність прийняття управлінських рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ставська С. Потенціал використання штучного інтелекту у вирішенні проблем екології і водокористування. Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», Київ, 2023. С. 241–243.

2. Pyo J., Pachepsky Y., Kim S., Abbas A., Kim M., Kwon Y. S., Ligaray M., Cho K. H. Long short-term memory models of water quality in inland water environments. *Water Research X*. 2023, V. 21, P. 100207.
3. Guo H., Chen Z., Teo F. Y. Intelligent water quality prediction system with a hybrid CNN–LSTM model. *Water Practice and Technology*. 2024, V. 19(11), P. 4538–4555.
4. Лосенко А. В., Козачко О. М., Варчук І. В. Нейромережевий ансамбль для прогнозування часових рядів на основі Prophet та LSTM. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2024. № 4. С. 49–57.
5. Zhang Q., Wang R., Qi Y. et al. A watershed water quality prediction model based on attention mechanism and Bi-LSTM. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022, V. 29, P. 75664–75680.
6. Gao Z., Chen J., Wang G., Ren S., Fang L., Yinglan A., Wang Q. A novel multivariate time series prediction of crucial water quality parameters with Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023, V. 259, P. 104262.

Марчук Данило Віталійович – аспірант групи G6-25а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: danchi0120@gmail.com.

Ніколенко Максим Сергійович – аспірант групи G6-25а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maximnikolenkokoic19b@gmail.com.

Науковий керівник: **Дудатьєв Ігор Андрійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри ІРТС, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Marchuk Danylo V. – postgraduate student, Department of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: danchi0120@gmail.com.

Nikolenko Maksym S. – postgraduate student, Department of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maximnikolenkokoic19b@gmail.com.

Supervisor: **Dudatiev Ihor A.** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of IRTS, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia