

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ВОДИ ВОДПОСТУ САМБІР

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі виконано системний аналіз водогосподарських балансів ділянок басейну Дністра та реалізовано інтелектуальне прогнозування рівнів води на автоматичному гідропості Самбір. Здійснено структурування та попередню обробку гідрологічних даних за 2024 рік, побудовано засоби геопросторової візуалізації дефіциту та резервів водних ресурсів. На основі інженерії ознак із застосуванням TSFRESH та врахування аномальних наводкових подій розроблено й порівняно спектр прогнозних моделей: спеціалізованих алгоритмів часових рядів (Facebook Prophet, AutoARIMA) і класичних моделей машинного навчання. Встановлено, що модель Prophet із налаштованою 90-денною сезонністю та порядком Фур'є 12 забезпечує найвищу точність короткострокового прогнозування ($RMSE = 4.02$ см, $MAPE = 1.88\%$). Результати спрямовані на оперативну підтримку прийняття управлінських рішень у сфері управління водними ресурсами.

Ключові слова: системний аналіз, прогнозування рівня води, часові ряди, машинне навчання, Prophet, ARIMA, гідроекологічний моніторинг, Дністер, водпост Самбір.

Abstract

This paper performs a systems analysis of the water management balances across sections of the Dniester River basin and implements intelligent water level forecasting at the Sambir automatic hydrological post. Hydrological data for 2024 were structured and preprocessed, and geospatial visualization tools for water resource deficits and reserves were constructed. Based on feature engineering using TSFRESH and accounting for anomalous flood events, a range of predictive models was developed and evaluated, including specialized time-series algorithms (Facebook Prophet, AutoARIMA) and classical machine learning models. It was established that the Prophet model with a tuned 90-day seasonality and a Fourier order of 12 achieves the highest short-term forecasting accuracy ($RMSE = 4.02$ cm, $MAPE = 1.88\%$). The results are aimed at operational decision support in water resource management.

Keywords: systems analysis, water level forecasting, time series, machine learning, Prophet, ARIMA, hydro-ecological monitoring, Dniester, Sambir hydrological post.

Вступ

Ефективне прийняття управлінських рішень у сфері охорони та раціонального використання водних ресурсів в умовах кліматичної нестабільності та зростаючого антропогенного навантаження вимагає впровадження новітніх інформаційних технологій і методів інтелектуального аналізу даних. Басейн річки Дністер є ключовим джерелом водопостачання для населення, агросектору та промисловості регіону, однак сезонні коливання стоку та суттєвий водозабір періодично призводять до виникнення просторових дефіцитів води, що створює значні екологічні й соціально-економічні ризики.

Науково-практична актуальність даної роботи зумовлена необхідністю синергії просторово-часового ГІС-аналізу, наочних засобів візуалізації та математичних моделей прогнозування для своєчасного виявлення критичних зон водно-екологічного ризику й інформаційної підтримки басейнового управління. Використання сучасних алгоритмів машинного навчання (зокрема моделей Facebook Prophet, AutoARIMA та ансамблевих регресій) забезпечує високоточне моделювання гідрологічної динаміки з урахуванням трендів, сезонних піків та екстремальних аномалій. У дослідженні представлено комплексну аналітичну систему для моніторингу просторового розподілу дефіцитів і резервів водного балансу, а також інтелектуального прогнозування рівнів води на гідрологічному посту Самбір. Усі результати спираються на офіційні відкриті гідрометеорологічні дані [1-4], реалізовані з використанням хмарної аналітичної платформи Kaggle [5-7] та методологічно узгоджені з фундаментальними працями [1, 2].

Результати дослідження

У ході проведення аналітичного дослідження створено багаторівневу інструментальну систему для оцінювання водогосподарського стану басейну річки Дністер. На початковому етапі виконано стандартизацію та структурування вихідного масиву гідрологічних даних у розрізі окремих водогосподарських ділянок.

Просторовий розподіл показників дефіциту водності продемонстровано на рисунках 1 та 2. На рисунку 1 наведено розраховані значення водного дефіциту за ділянками Дністровського басейну для різних рівнів забезпеченості стоку.



Рисунок 1 – Дефіцит води для ділянок басейну Дністра

Аналіз отриманих часових залежностей указує на те, що найбільші величини дефіциту концентруються у середній течії басейну (зокрема, на ділянці M5.2.0.07), що дозволяє чітко локалізувати потенційно вразливі території. На рисунку 2 подано інтерактивну картограму, де просторова інтенсивність дефіциту репрезентована колірною градацією червоних відтінків, а наявні обсяги резервів – діаметрами синіх кіл. Такий спосіб геовізуалізації забезпечує комплексне висвітлення просторово-часового дисбалансу водозабезпечення регіону.

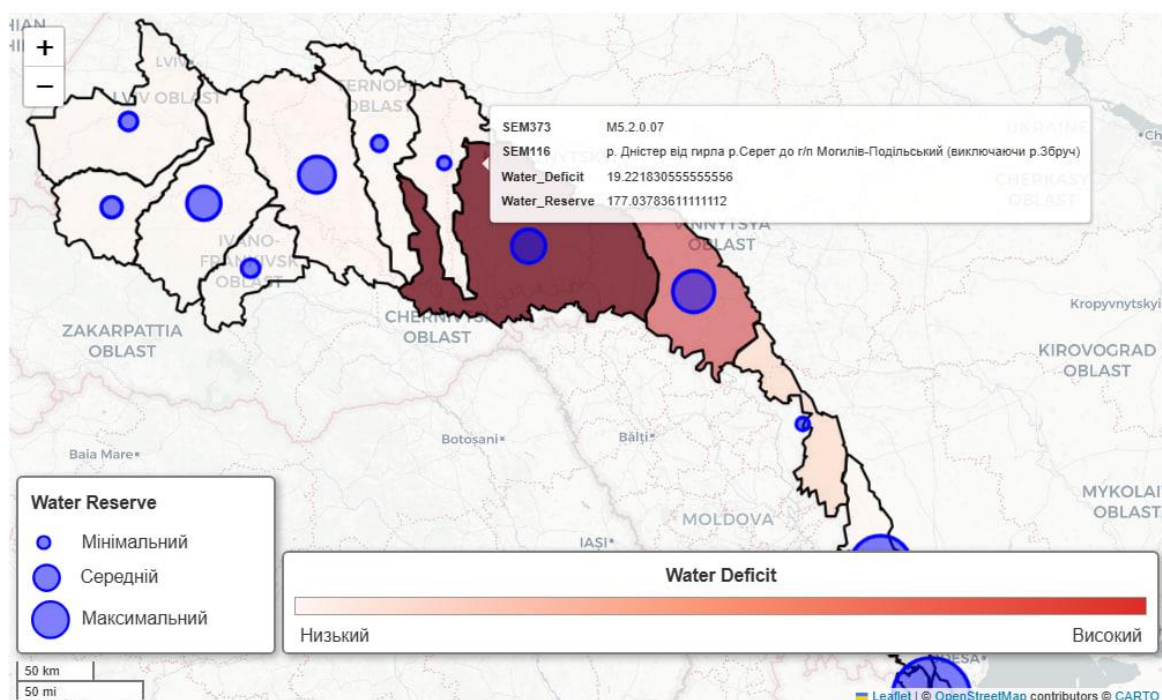


Рисунок 2 – Інтерактивна карта дефіцитів та резервів води по водогосподарських ділянках

Наступний блок роботи присвячено розробці та верифікації алгоритмів машинного навчання для автоматизованого прогнозування рівнів води на гідропості Самбір. Спектр досліджених підходів охоплює як спеціалізовані методи аналізу часових рядів (Facebook Prophet, AutoARIMA), так і багатофакторні регресори (XGBoost, SVR, MLP, Random Forest тощо). Зведену таблицю оцінки точності побудованих моделей за метриками RMSE та MAPE наведено на рисунку 3.

	name_model	type_data	rmse	mape
1	Prophet_90_days_12_order	valid	4.022401	1.884423
3	Prophet_120_days_12_order	valid	5.587048	1.885493
0	Prophet_90_days_3_order	valid	7.944837	3.834091
2	Prophet_120_days_3_order	valid	9.204907	4.108606
4	ARIMA_auto	valid	18.312926	9.504273
5	Linear Regression	valid	18.354673	9.636801
7	Support Vector Machines	valid	18.611706	9.745185
11	XGB Regressor	valid	19.546444	10.162004
12	MLP Regressor	valid	20.615144	10.76602
8	Linear SVR	valid	23.047482	11.950311
9	Random Forest Regressor	valid	23.38252	12.176625
6	KNeighbors Regressor	valid	24.051777	12.541644
10	Bagging Regressor	valid	46.431805	23.723162

Рисунок 3 – Порівняльна таблиця точності моделей

За результатами порівняльного аналізу встановлено, що найвищу точність короткострокового прогнозування забезпечує модель Prophet із кастомною 90-денною сезонністю та порядком Фур'є 12, яка досягла мінімальних похибок: RMSE = 4.02 та MAPE = 1.88%. Результати 5-денного контрольного випробування оптимальної конфігурації моделі відображено на рисунку 4.

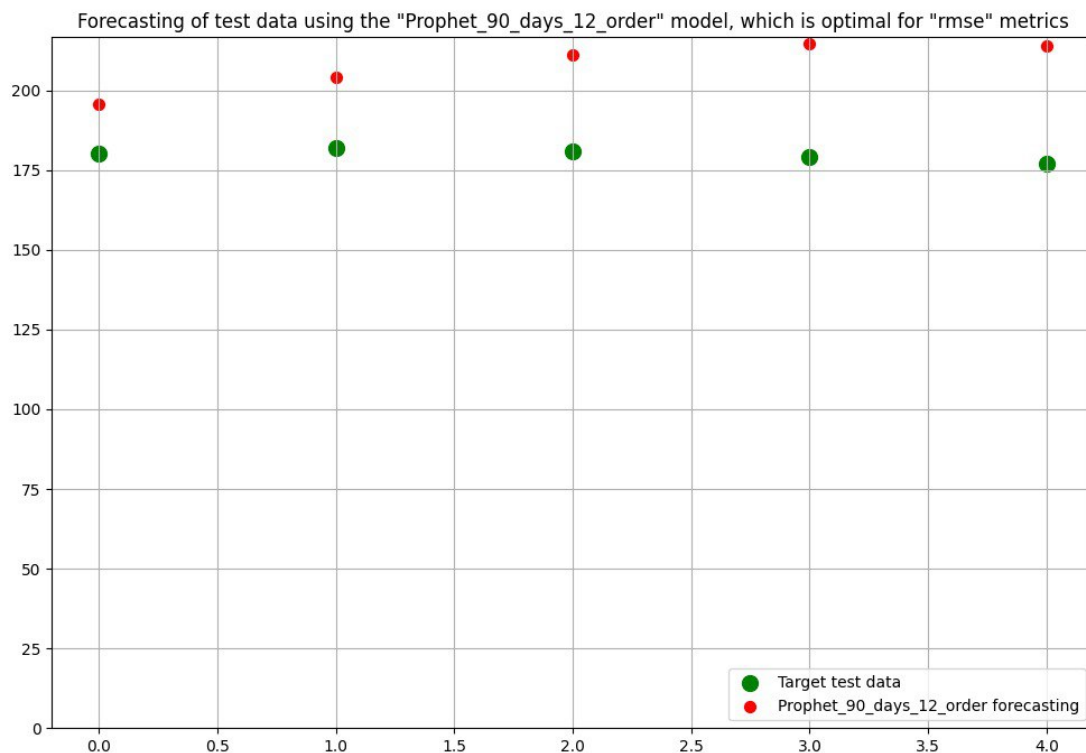


Рисунок 4 – Результати 5-денного прогнозування рівня води на тестовому наборі даних за допомогою моделі Prophet_90_days_12_order

На графіку зелені маркери відповідають фактичним вимірним значенням рівня води на тестовій вибірці, тоді як червоні точки відображають розрахований прогноз моделі Prophet. Отримана прогнозна траєкторія має гладку монотонну форму, що підтверджує стійке врахування трендової та сезонної складових. Зафіксована помірна систематична переоцінка рівня створює сприятливий технологічний запас безпеки для превентивного реагування на паводкові загрози та підтримки прийняття управлінських рішень у басейні Дністра.

Висновки

У результаті здійсненого системного аналізу гідрологічних показників водогосподарських ділянок басейну річки Дністер виконано систематизацію вхідної інформації, розроблено геоінформаційні засоби візуалізації дефіциту й резервів водних ресурсів та побудовано спектр прогнозних моделей на основі передових методів машинного навчання.

На основі синтезованих даних створено інтерактивні картограми просторового розміщення дефіциту та резервів води, які забезпечують експрес-діагностику критичних водно-екологічних зон і сприяють обґрунтованому прийняттю управлінських рішень. Апробовано комплекс моделей для короткострокового прогнозування рівня води, де найвищу точність за оцінками $RMSE = 4.02$ та $MAPE = 1.88\%$ продемонстрував спеціалізований алгоритм Facebook Prophet із 90-денним сезонним періодом і порядком Фур'є 12.

Створена аналітично-прогнозна система відзначається високою точністю передбачення, стійкістю при перенавчанні, гнучким урахуванням сезонної динаміки та високою адаптивністю до нових масивів спостережень. Сформовані результати спрямовані на практичне використання у басейновому управлінні водними ресурсами, а також для превентивного запобігання надзвичайним ситуаціям, спричиненим водним дефіцитом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Водогосподарський баланс для району басейну річки Дністер. URL: https://www.davr.gov.ua/fls18/balans_dnister.pdf.
2. Дані автоматичних гідрологічних постів. URL: <https://www.meteo.gov.ua/ua/Dani-avtomatichnikh-hidrolohichnikh-postiv>.

3. План управління річковим басейном Дністра на 2025-2030 роки : Затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 01.11.2024 р. № 1078-р. URL: https://davr.gov.ua/fls18/PURBDniester7_ukr.pdf.
4. Про затвердження Порядку розроблення водогосподарських балансів : Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 17.02.2017 р. №232/30100. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0232-17#Text>.
5. Kaggle Dataset «Water Balance Dnister». URL: <https://www.kaggle.com/datasets/annhaiovyh/dnister>.
6. Kaggle Notebook «Dnister Balance EDA & Visualization». URL: <https://www.kaggle.com/code/annhaiovyh/dnister-balance-eda-visualization>.
7. Kaggle Notebook «Water level – EDA & forecasting». URL: <https://www.kaggle.com/code/annhaiovyh/water-level-eda-forecasting>.
8. Наюк А. О., Крижановський Є. М., Штельмах І. М., Войцеховська О. О. Метод визначення площі дзеркал водних об'єктів водогосподарської ділянки з використанням супутникових зображень. Вісник Вінницького політехнічного інституту. Вінниця : ВНТУ, 2026, №2, с.71-78

Сокіл Анна Михайлівна – студентка групи СА-25м, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ann.gajovich@gmail.com.

Крижановський Євгеній Миколайович – к.т.н., доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, e-mail: kruzhan@vntu.edu.ua.

Ігор Миколайович Штельмах – канд. техн. наук, старший викладач кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: igor.shtelmakh@vntu.edu.ua.

Sokil Anna M. – student of Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, SA-25m, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ann.gajovich@gmail.com.

Kryzhanovskyi Yevhenii M. – Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kruzhan@vntu.edu.ua.

Shtelmah, Igor M. – candidate of technical sciences, assistant professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: igor.shtelmakh@vntu.edu.ua.