

ПРОГНОЗУВАННЯ ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ
НА ОСНОВІ ІНСТРУМЕНТІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇFORECASTING OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT INDICATORS
BASED ON DIGITALIZATION TOOLS

УДК 330.3:004.9

DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.15-29>**Шапуров О.О.¹**

д.е.н., професор кафедри
інформаційної економіки,
підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут
імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Коваленко О.В.²

д.е.н., професор кафедри
інформаційної економіки,
підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут
імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Стоєв В.Л.³

к.е.н., доцент кафедри інформаційної
економіки, підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут
імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

Shapurov Olexandr

Engineering Educational
and Scientific Institute
named by Yuriy Potebni
Zaporizhzhia National University

Kovalenko Olena

Engineering Educational
and Scientific Institute
named by Yuriy Potebni
Zaporizhzhia National University

Stoiev Volodymyr

Engineering Educational
and Scientific Institute
named by Yuriy Potebni
Zaporizhzhia National University

Сучасні економічні процеси України зазнають впливу війни, інфляції, логістичних труднощів, екологічних проблем, соціальної нерівності, депресії промислових регіонів та масової еміграції. Міграція призводить до втрати людського капіталу, дефіциту робочої сили, змін у структурі населення та скорочення ВРП у постраждалих регіонах. Для сталого розвитку важливі збереження людського капіталу та цифровізація. Основні підходи до прогнозування – класичні (ARIMA, GARCH) і методи інтелектуального аналізу (ANN, SVM, kNN, Random Forest). Для їх реалізації використовуються RStudio, MATLAB, Excel, Google Colab, Kaggle Notebooks. Дослідження 2018–2023 років засвідчують зростання інтересу до цифровізації. Аналіз показників Запорізького регіону (населення, інфраструктура, промисловість, ВРП) демонструє стабільність за GARCH, чутливість до коливань за Random Forest і консервативність за ARIMA. Вибір моделі залежить від цілей: ARIMA – для стабільних прогнозів, Random Forest і GARCH – для динамічних змін. Хмарні платформи спрощують процес аналізу, сприяючи сталому розвитку регіонів України.

Ключові слова: сталий розвиток, прогнозування часових рядів, GARCH-модель, випадковий лис, цифрові технології.

In today's conditions, the economic processes in Ukraine are significantly influenced by numerous factors, including the military situation, inflation, logistical difficulties, environmental problems, social inequality, the depression of industrial regions, and mass emigration. Migration processes, particularly those caused by the war, have had a particularly profound impact, leading to a decrease in human capital, labor shortages, demographic changes, and a reduction in the gross regional product in the affected regions. To ensure sustainable development, it is crucial to focus on preserving human capital and implementing digital technologies. Among the modern methods of time series forecasting, which allow for the analysis of economic indicators in the short- and medium-term, two main approaches are highlighted: classical methods, such as ARIMA and GARCH, and methods of data mining, including neural networks (ANN), support vector machines (SVM), k-nearest neighbors (kNN), and random forests (Random Forest). These approaches are commonly implemented using programming environments such as RStudio, MATLAB, and Excel with add-ons. However, for more convenient and cost-effective analysis, cloud platforms like Google Colab and Kaggle Notebooks are increasingly used, as they are free and do not require installation. An assessment of sustainable development indicators based on scientific research from 2018–2023, using SciVal and Scopus, shows a growing interest in the digitalization of regional development. Practical analysis of the dynamics of sustainable development in the Zaporizhzhia region revealed indicators such as population size, digital infrastructure development, industrial production volumes, and gross regional product (GRP). Forecasting these indicators using the GARCH, Random Forest, and ARIMA models highlighted their strengths. The GARCH model demonstrated stable growth with a gradual trend. Random Forest showed significant sensitivity to fluctuations, predicting both sharp increases in certain indicators (K5, K6) and declines. ARIMA provided more conservative forecasts, ensuring stability for a number of indicators. The choice of forecasting model depends on the goals: ARIMA is suitable for obtaining stable long-term predictions, while Random Forest and GARCH are more appropriate for accounting for dynamic changes. Cloud platforms significantly simplify this process, making it accessible to a wider range of users. Therefore, the implementation of digital technologies is a key element in ensuring sustainable development in Ukraine's regions.

Key words: sustainable development, time series forecasting, GARCH model, Random Forest, digital technologies.

Постановка проблеми. В умовах сьогодення економічні процеси країни залежать від багатьох чинників та явищ. Військовий стан, інфляційні процеси, логістичні чинники це одна частина великого рецесивного вектору. З іншої сторони екодеструктивні процеси, збільшення % бідності, проблемні питання освіти, депресивність старопромислових регіонів країни. Еміграційні процеси, які відбуваються в наслідок військових дій приводять до катастрофічних наслідків для держави та її регіонів. На даний час за кордоном перебувають близько 8 млн. чол. і це ще не кінець. Основні

держави, що прийняли на себе тягар еміграційних потоків: Польща, Німеччина, Іспанія, Італія, Чехія, США, Канада. З перелічених країн більш третини мігрантів (2,7-3 млн.чол.) припадають на Польщу та Німеччину. Міграційні процеси України, які відбулись призвели до деградації людського капіталу, дефіциту робочої сили в країні, значної плінності кадрів на промислових підприємствах, зміни структури населення країни, скороченню валового регіонального продукту (Запорізький, Луганський, Донецький, Херсонський регіон). Можемо констатувати, що проблемні питання

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4381-4886>² ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6802-7213>³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4933-2992>

поставали в вищезгаданих регіонах і до військових дій: значний % безробітних, екологічні проблеми (прикладом може послужити викиди у розмірі 300-400 г/чол. на добу); збитковість промислових підприємств; деградованої структурою промисловості (переважна кількість промислових підприємств належить до гірничо-добувної або металургійної галузі). Але повномасштабна війна призвела до міграційної катастрофи, валютних зрушень та зниженню купівельної спроможності населення майже вдвічі.

Таким чином можна стверджувати, що тільки сталий розвиток регіонів, збереження людського капіталу країни дасть можливість розвитку національної економіки країни. Для визначення перспектив сталого розвитку країни визначимо основні інструменти цифровізації та оцінимо індикатори, що дає можливість визначити основні стратегічні перспективи країни в майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За допомогою бібліографічного інструменту SciVal бази даних Scopus було проаналізовано наукові статті на тему «Прогнозування індикаторів сталого розвитку на основі інструментів цифровізації» за період з 2018 по 2023 роки. Графік показує, що дослідники все більше уваги приділяють вивченню індикаторів сталого розвитку на основі цифрових інструментів. Загалом за останні п'ять років було опубліковано 165 статей, причому кількість таких статей зростала з 2019 року (10 статей) до 2023 року (59 статей). Це також підтверджує, що сталий розвиток все ще є відносно новою галуззю.

Дослідження Олени Ареф'євої висвітлює методологічні засади циркулярної економіки як ключового елементу забезпечення економічної безпеки промислових підприємств у контексті сталого розвитку. Авторка акцентує увагу на значущості

ресурсозабезпеченості, вторинного використання матеріалів і впровадження екоінноваційних технологій, які сприяють сталому розвитку підприємств та регіонів. В дослідженні використовується статистична база промислових підприємств, але вона охоплює незначний ретроспективний період, методи розрахунку стандартні, без врахування сучасних інструментів цифровізації [1].

Наукове дослідження Вікторії Клименко присвячена модернізації та розширенню функціональних можливостей аеропортової інфраструктури з акцентом на трансформацію аеропортів у сучасні та екологічно безпечні простори в межах соціотехнічних систем. Це питання є важливим не лише для зменшення негативного впливу аеропортів на навколишнє середовище, але й для покращення умов життя та здоров'я навколишніх громад, працівників аеропортів та пасажирів, що чекають на рейси. Все це є невід'ємною складовою сталого розвитку сучасного суспільства. Дослідження авторки не спирається на відповідні методи вивчення часових рядів та не дає результатів впливу аеропортів на екологічні тенденції екосистеми [2].

Екоіндустріальні парки на мезорівні є важливим підходом до реалізації циркулярної економіки. Робота Франсіско Агуайо-Гонсалеса розробляє онтологічну структуру для циркулярної економіки, засновану на промисловому метаболізмі, як технологію для ефективного використання циркулярних ресурсів через промислові екосистеми. Створена онтологія з інтеграцією багатоагентних систем і методів екологічного мережевого аналізу сприяє покращенню кругообігу технічних поживних речовин і зменшенню витрат біологічних ресурсів, що підтримує сталий розвиток через створення розумних екоіндустріальних парків.

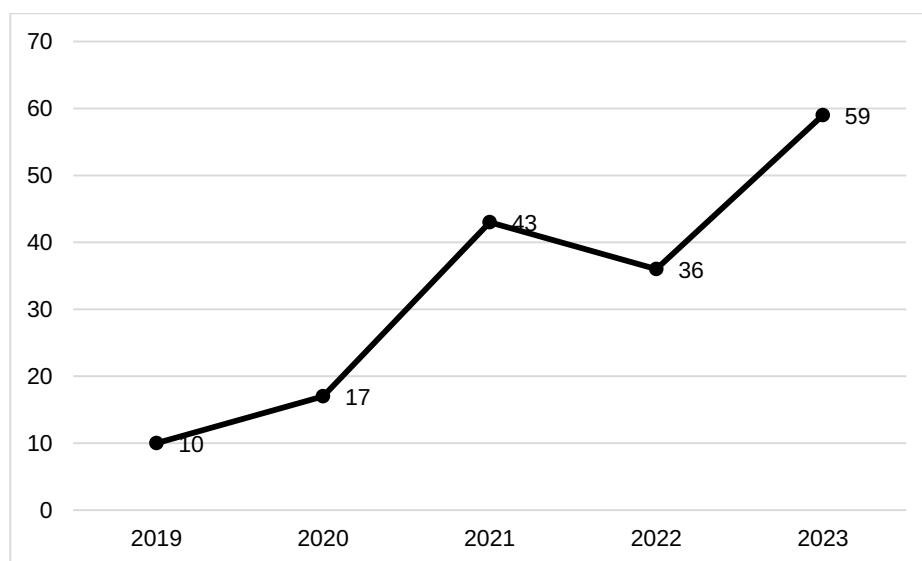


Рисунок 1 – Наукові результати (Scholarly Output) за темою: "Прогнозування індикаторів сталого розвитку на основі інструментів цифровізації"

Нажаль ми не бачимо чітких методів прогнозування взаємозв'язку та взаємодії елементів, що можливе лише за рахунок інструментів цифровізації та чітко побудованої системи індикаторів [3].

Швидкі зміни в середовищі міської мобільності та поточні технологічні тенденції створюють серйозні виклики для політиків, які намагаються оцінити можливі наслідки цих змін. Дослідження Ельпіди Ксеноу спрямоване на вирішення цих проблем шляхом розробки методики для прогнозування ефекту переходу в міському середовищі мобільності. Вона запропонувала структуру для збору та аналізу даних у містах, що дозволяє оцінити майбутній вплив змін на міську мобільність, зокрема на прикладах Будапешта та Тель-Авіва. Порівняння цих міст показало, як зміни можуть призвести до підвищення рівня завантаженості вулиць та погіршення якості повітря. Однак важливим недоліком цієї роботи є відсутність системи прогнозних критеріїв, яка є необхідною для досягнення сталого розвитку міста, оскільки без таких індикаторів важко оцінити довгострокові ефекти та вплив змін на екологічну та соціальну стабільність [14].

У своїй роботі Темітопе Адефарі розглядає мотивацію для впровадження SHES, аналізує ключові аспекти, пов'язані з відновлюваними джерелами енергії, та досліджує важливість таких систем для досягнення декарбонізованої енергетичної мережі. Однак, хоча технології SHES є важливим кроком до сталого розвитку, однією з основних проблем є відсутність системи прогнозування індикаторів сталого розвитку, яка необхідна для ефективного планування та оцінки впливу таких систем на енергетичний сектор в довгостроковій перспективі. Використання інструментів цифровізації може значно покращити процес прогнозування та забезпечити точніші оцінки, що є необхідним для стійкого розвитку енергетичних мереж у різних регіонах [5].

У сучасних наукових дослідженнях, присвячених сталому розвитку та циркулярній економіці, виникають значні виклики, пов'язані з відсутністю ефективних систем прогнозування індикаторів сталого розвитку, зокрема на основі інструментів цифровізації. Роботи Олени Арєф'євої, Вікторії Клименко, Франсиско Агуайо-Гонсалеса, Ельпіди Ксеноу та Темітопе Адефарі демонструють важливість застосування новітніх технологій для розвитку сталих моделей у різних секторах, таких як промисловість, аеропорти, енергетика та міська мобільність. Однак, загальним недоліком усіх цих досліджень є обмеження у використанні систем прогнозування, що ускладнює точну оцінку довгострокових наслідків та впливу різних інновацій на сталий розвиток. Для більш ефективного планування та аналізу необхідно впроваджувати інструменти цифровізації, які дозволять розробити чіткі

індикатори сталого розвитку, що дасть змогу прогнозувати та коригувати вплив технологій на екологічну та соціальну стабільність, сприяючи таким чином досягненню сталого розвитку в кожному з обраних напрямів.

Постановка завдання. Головною метою дослідження є прогнозування індикаторів сталого розвитку на основі інструментів цифровізації. Для забезпечення реалізації головної мети дослідження були вирішені наступні завдання: проведено бібліографічний аналіз за допомогою цифрового інструменту SciVal; визначені базові індикатори сталого розвитку за допомогою інструменту Data Science – DATASET SEARCH RESEARCH GOOGLE; здійснено прогноз індикаторів сталого розвитку на основі методів ARIMA, GARCH, Random Forest, всі етапи прогнозу реалізовано за допомогою RStudio.

Методи дослідження. SciVal – це аналітичний інструмент і платформа, надані компанією Elsevier, для доступу до яких потрібна підписка. Модуль тенденцій SciVal було використано для проведення виявлення найактивніших авторів, а також виявлення відомих тенденцій у галузі. Більше того, модуль огляду SciVal служив цінним ресурсом для висвітлення критичних ідей, включаючи найвищі проценти цитувань, проценти журналів і найбільш цитовані статті протягом останніх п'яти років з дослідженого напрямку [6]. Random Forest було обрано для цього аналізу, тому що це непараметричний метод, який не залежить від попереднього знання екологічних факторів або атрибутів, пов'язаних з прогнозом або результатами. Крім того, як і інші методи класифікації та дерева регресії (CART), RF забезпечує простоту обчислень і може ефективно обробляти великі набори даних, які ми отримаємо з платформи Dataset Search [7].

Виклад основного матеріалу дослідження. Для аналізу використано набір даних платформи Dataset Search Research Google під назвою «Оцінка сталого розвитку регіонів України за 2013–2021 роки та виявлення факторів регіональної диференціації: набір даних». Цей набір є супровідним матеріалом до наукового дослідження, проведеного в рамках науково-дослідної роботи Сумського державного університету «Реструктуризація національної економіки в напрямі цифрових трансформацій для сталого розвитку» (№ 0122U001232). Дані містять показники, які використовувались для розрахунку індексу сталого розвитку регіонів на основі адаптованого методичного підходу до оцінки субнаціонального індексу людського розвитку (Human Development Index, HDI), доповненого екологічною складовою. Також набір даних включає інформацію для аналізу факторів, що впливають на регіональну диференціацію сталого розвитку.

При підготовці набору даних були використані статистичні матеріали Державної служби статистики України, регіональні звіти про стан довкілля, екологічні паспорти областей і міст загальнодержавного підпорядкування, а також інші дані від національних регуляторів. Набір охоплює річні дані за 58 характеристиками регіонального розвитку: для 24 областей України, Автономної Республіки Крим, міст Києва та Севастополя, за 2014–2021 роки

Виходячи з опитування фахівців стратегічних підприємств Запорізького регіону (ПАТ «Запоріжсталь», ПАТ «Дніпроспецсталь», ПрАТ «Запоріжсклофлюс», ТОВ «Сяйвомет») з набору даних визначені найбільш важливі на їх погляд індикатори сталого розвитку Запорізького регіону для подальшого прогнозу: чисельність постійного населення (за оцінкою), осіб (k_1); частка домогосподарств, які мають доступ до послуг інтернету вдома, відсотків (k_2); абоненти мобільного зв'язку, тис. од. (k_3); розвиток цифрової інфраструктури (k_4); валовий регіональний продукт у фактичних цінах, млн. грн (k_5); обсяг реалізованої промислової продукції (товарів, послуг), млн. грн (k_6); зовнішньоторговельний оборот товарів, млн. дол. (k_7); утворено відходів, тис. т (k_8).

Прогнозування часових рядів на короткий та середньостроковий період широко вивчається в літературі. Методи прогнозування часових рядів можна класифікувати на класичні методи, засновані на Боксі та Дженкінсі [8], такі як ARIMA або GARCH; і методи інтелектуального аналізу даних [9], такі як нейронні мережі (ANN), опорна векторна машина (SVM) або методи ближнього сусідства (kNN), метод лісів (Random Forest).

Основні десктопні програми, які використовуються для реалізації наведених вище методів: RStudio [10], MATLAB [11] або Excel із доповненнями, такими як XLSTAT. Для швидкого та зручного аналізу рекомендується використовувати Google Colab [12] або Kaggle Notebooks, оскільки вони безкоштовні, прості у використанні та не потребують встановлення програмного забезпечення.

Приклад розрахунку моделі ARIMA, на RStudio для індикатора сталого розвитку «валовий регіональний продукт (ВРП)» наведено в таблиці 1.

ARIMA – аналіз передбачає побудову моделі для прогнозування індикаторів (зокрема валового регіонального продукту (ВРП) у фактичних цінах на період 2022–2026 років). Процес складається з декількох етапів. Спочатку завантажуються необхідні інструменти для аналізу, зокрема бібліотека `forecast`, яка забезпечує функціонал для роботи з часовими рядами. Дані про ВРП за період 2013–2021 років вводяться у вигляді числового вектору, де кожне значення відповідає певному року. В подальшому дані перетворюються на часовий ряд із річною частотою, починаючи

з 2013 року. Це дозволяє представити їх у форматі, зручному для аналізу. На основі створеного часового ряду будується графік, який наочно демонструє динаміку ВРП за аналізований період. Наступним кроком є перевірка стаціонарності часового ряду за допомогою тесту Дікі-Фуллера (ADF-тесту). Цей тест визначає, чи є часовий ряд стаціонарним, тобто чи залишаються його статистичні характеристики незмінними в часі. Якщо ряд виявляється нестационарним, застосовуються відповідні трансформації для досягнення стаціонарності. Після цього здійснюється автоматичний підбір параметрів моделі ARIMA, яка описується трьома компонентами: порядок авторегресії (p), порядок диференціювання (d) та порядок ковзного середнього (q). Ці параметри визначаються автоматично, а результати моделі аналізуються для перевірки її адекватності. На основі побудованої моделі ARIMA виконується прогнозування значень ВРП на період 2022–2026 років.

Результати прогнозу включають як самі прогнозовані значення, так і довірчі інтервали, що вказують на можливий діапазон значень із певною ймовірністю. Завершальним етапом є візуалізація прогнозу. Графік показує як фактичні значення ВРП за попередні роки, так і прогнозовані значення на майбутній період із зазначенням довірчих інтервалів. Це дозволяє оцінити динаміку розвитку регіональної економіки та зробити висновки про її перспективи [14].

Етапи розрахунку моделі GARCH на RStudio для індикатора сталого розвитку «валовий регіональний продукт (ВРП)» наведено в таблиці 2.

Прогнозування Валового регіонального продукту (ВРП) виходячи з таблиці 2 здійснюється методами моделювання волатильності на основі моделі GARCH (Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity). Першим кроком є підготовка вхідних даних: маються на увазі дані про ВРП за період з 2013 по 2021 рік. Для подальшого аналізу застосовуються логарифмічні зміни цих значень, оскільки логарифмічні прибутки дозволяють нормалізувати дані та усунути вплив масштабу. На основі отриманих логарифмічних змін, будується модель GARCH(1,1), яка є однією з найпоширеніших моделей для оцінки та прогнозування волатильності.

Модель GARCH дозволяє передбачити змінність часового ряду на майбутні періоди, що є ключовим аспектом для оцінки ризиків і коливань економічних показників. У даному випадку модель GARCH(1,1) передбачає, що волатильність на поточний момент часу залежить від попередньої волатильності та попередніх помилок. Після побудови та оцінки моделі, прогнозується волатильність для наступних п'яти періодів. Це дає можливість отримати прогнозовані значення волатильності (стандартного відхилення)

Приклад розрахунку моделі ARIMA на RStudio для індикатора сталого розвитку валовий регіональний продукт (ВРП)

Етап	Код RStudio	Результат RStudio
# Завантаження необхідних бібліотек	<code>install.packages("forecast") library(forecast) install.packages("tseries") library(tseries)</code>	пакет 'forecast' успішно розпаковано, MD5-суми перевірено пакет 'tseries' успішно розпаковано, MD5-суми перевірено
# Дані для Валовий регіональний продукт	<code>years <- 2013:2021 grp <- c(54352, 65968, 89061, 104323, 130187, 147043, 155158, 167260, 228906)</code>	-
# Створення часового ряду	<code>grp_ts <- ts(grp, start = 2013, frequency = 1)</code>	-
# Перевірка стаціонарності за допомогою ADF-тесту	<code>adf_test <- adf.test(grp_ts) print(adf_test)</code>	Augmented Dickey-Fuller Test data: grp_ts Dickey-Fuller = -56.364, Lag order = 2, p-value = 0.01 alternative hypothesis: stationary
# Автоматичний підбір параметрів ARIMA	<code>auto_model <- auto.arima(grp_ts) summary(auto_model)</code>	Series: grp_ts ARIMA(0,1,0) with drift Coefficients: drift 21819.250 s.e. 5670.859 sigma^2 = 2.94e+08: log likelihood = -88.81 AIC=181.63 AICc=184.03 BIC=181.79 Training set error measures: ME RMSE MAE MPE MAPE MASE ACF1 Training set 3.614748 15122.18 10035.89 -1.974924 6.86285 0.4599559 -0.1233918
# Прогноз на наступні 5 років	<code>forecast_result <- forecast(auto_ model, h = 5) print(forecast_result)</code>	Point Forecast Lo 80 Hi 80 Lo 95 Hi 95 2022 250725.2 228750.6 272699.9 217117.9 284332.6 2023 272544.5 241467.6 303621.4 225016.5 320072.5 2024 294363.7 256302.5 332425.0 236154.1 352573.4 2025 316183.0 272233.6 360132.4 248968.2 383397.8 2026 338002.2 288865.4 387139.1 262853.9 413150.6

Джерело: розроблено авторами

для кожного з наступних років. Оскільки модель GARCH прогнозує саме волатильність, а не рівень самого показника (ВРП), для отримання прогнозованих значень ВРП потрібно додати прогнозовану волатильність до останнього значення логарифмічних змін, яке отримано з початкових даних. Потім застосовується експоненція для отримання фактичних прогнозованих значень ВРП на наступні роки [15].

Етапи розрахунку моделі Random Forest на RStudio для індикатора сталого розвитку «валовий регіональний продукт (ВРП)» наведено в таблиці 3.

Першим кроком є підготовка вхідних даних. Спочатку створюється датафрейм, який містить два стовпці: роки та відповідні значення ВРП. Оскільки Random Forest потребує як вхідні, так і вихідні змінні, створюється нова змінна, що представляє логарифмічні зміни ВРП між поточним

і попереднім роком. Модель Random Forest будується за допомогою функції `randomForest()`, де залежною змінною є логарифмічна зміна ВРП, а незалежною – рік. Це дозволяє моделі навчитися на основі історичних даних і створити залежність між роками та змінами ВРП. Після навчання моделі, прогнозуються зміни ВРП для наступних п'яти років (2022–2026).

Оскільки модель передбачає зміни у вигляді логарифмічних змін, ці прогнози потрібно перетворити в рівні значення ВРП. Для цього використовується експоненція, а також обчислюється кумулятивна сума прогнозованих змін, що дозволяє отримати фактичні значення ВРП для кожного з наступних років [16].

Результати розрахунку прогнозних індикаторів сталого розвитку за розглянутими моделями наведено в таблиці 4.

Таблиця 2

Приклад розрахунку моделі GARCH на RStudio для індикатора сталого розвитку валовий регіональний продукт (ВРП)

Етап	Код RStudio	Результат RStudio
# Завантаження бібліотек для GARCH # Вхідні дані	library(rugarch) years <- 2013:2021 grp <- c(54352, 65968, 89061, 104323, 130187, 147043, 155158, 167260, 228906)	Прогнозні значення T+1 255015.3 T+2 255529.7 T+3 256035.4 T+4 256532.7 T+5 257022.3
# Обчислення логарифмічних змін	log_returns <- diff(log(grp))	
# Побудова моделі GARCH(1,1)	library(rugarch) spec <- ugarchspec(variance.model = list(model = "sGARCH", garchOrder = c(1, 1)), mean.model = list(armaOrder = c(0, 0), include.mean = TRUE), distribution.model = "norm") fit <- ugarchfit(spec = spec, data = log_returns)	
# Прогнозування волатильності на 5 періодів	forecast <- ugarchforecast(fit, n.ahead = 5) forecast_volatility <- forecast@forecast\$sigmaFor	
# Останнє значення часового ряду (логарифмічні зміни)	last_value <- log(grp[length(grp)])	
# Прогнозування значень ВРП	forecast_values <- exp(last_value + forecast_volatility)	
# Виведення результатів	forecast_values	

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3

Приклад розрахунку моделі Random Forest на RStudio для індикатора сталого розвитку валовий регіональний продукт (ВРП)

Етап	Код RStudio	Результат RStudio
# Завантажуємо необхідний пакет	library(randomForest)	285034.5 354925.9 441954.8 550323.6 685264.7
# Вхідні дані	years <- 2013:2021 grp <- c(54352, 65968, 89061, 104323, 130187, 147043, 155158, 167260, 228906)	
# Підготовка даних	data <- data.frame(years, grp)	
# Для методу Random Forest необхідно мати наявність як вхідних, так і вихідних змінних # Тому створимо нову змінну, яка буде представляти різницю між поточним значенням та попереднім (це буде залежна змінна)	data\$log_diff <- c(NA, diff(log(grp)))	
# Видаляємо перший рядок, де немає значення для log_diff	data <- na.omit(data)	
# Навчання моделі Random Forest	rf_model <- randomForest(log_diff ~ years, data = data)	
# Прогнозування на наступні 5 років	future_years <- data.frame(years = 2022:2026) predictions <- predict(rf_model, future_years)	
# Перетворення прогнозів у рівні значення ВРП (експоненціація прогнозованих логарифмічних змін)	last_grp <- grp[length(grp)] forecast_values <- exp(log(last_grp) + cumsum(predictions))	
# Виведення результатів	forecast_values	

Джерело: розроблено авторами

Запорізький регіон стикається з низкою викликів та перспектив у контексті сталого розвитку, що впливають із прогнозованих моделей. Насамперед, спостерігається тенденція до скорочення чисельності населення. За даними GARCH, чисельність населення стабілізується на рівні близько 1,64 млн осіб у 2026 році.

Водночас Random Forest і ARIMA прогнозують стійке скорочення: до 1,52 млн осіб (Random Forest) і 1,49 млн осіб (ARIMA) відповідно. Ця демографічна криза може суттєво зменшити трудові ресурси, негативно вплинути на економічну активність та призвести до подальшого старіння населення. Розвиток цифрової інфраструктури демонструє позитивну динаміку. Частка домогосподарств із доступом до Інтернету зростатиме до 86,54% у 2026 році за прогнозами Random Forest, тоді як GARCH і ARIMA вказують на стабілізацію цього показника на рівні 84,5% і 77% відповідно. Аналогічно, розвиток цифрової

інфраструктури зростатиме до 42,21 пункту (Random Forest) або стабілізується на рівні 42,85–39 пунктів за іншими моделями. Валовий регіональний продукт (ВРП) за Random Forest зросте до 685,3 млрд грн у 2026 році, тоді як GARCH і ARIMA прогнозують більш скромне зростання до 257 млрд грн та 338 млрд грн відповідно. Аналогічно, обсяг реалізованої промислової продукції за Random Forest зросте до 950,6 млрд грн, тоді як GARCH і ARIMA прогнозують лише 370,9 млрд грн та 440,2 млрд грн відповідно. Зовнішньоторговельний оборот за Random Forest досягне 31,6 млрд доларів США у 2026 році, що свідчить про стрімку інтеграцію у світову економіку. Натомість GARCH і ARIMA прогнозують значно нижчі показники (9,2 млрд доларів і 4,78 млрд доларів відповідно), що вказує на можливі перешкоди у зовнішньоекономічній діяльності. Це вимагає активізації програм розширення експорту, особливо високотехнологічних товарів. Кількість утворених відходів

Таблиця 4

Результати розрахунку прогнозних індикаторів сталого розвитку

Показники	GARCH модель				
	прогноз 2022	прогноз 2023	прогноз 2024	прогноз 2025	прогноз 2026
K1	1643957	1644053	1644148	1644241	1644333
K2	85,73747	84,84957	84,60334	84,53794	84,52079
K3	2516,091	2514,399	2512,724	2511,066	2509,425
K4	43,37707	42,97366	42,87939	42,85821	42,85351
K5	255015,3	255529,7	256035,4	256532,7	257022,3
K6	365311,5	366749	368162,5	369553,4	370922,9
K7	9060,506	9105,217	9149,362	9192,969	9236,064
K8	5516,346	5503,36	5491,962	5481,954	5473,166
Показники	Random Forest модель				
	прогноз 2022	прогноз 2023	прогноз 2024	прогноз 2025	прогноз 2026
K1	1614496	1591647	1569121	1546914	1525021
K2	78,82	80,68	82,59	84,54	86,54
K3	2375,87	2409,201	2442,999	2477,272	2512,025
K4	39,62258	40,255	40,897	41,55	42,213
K5	285034,5	354925,9	441954,8	550323,6	685264,7
K6	378915,2	476881,8	600177,3	755350,2	950642,2
K7	9232,039	12557,912	17081,941	23235,766	31606,527
K8	5400,672	5392,356	5384,053	5375,763	5367,486
Показники	ARIMA модель				
	прогноз 2022	прогноз 2023	прогноз 2024	прогноз 2025	прогноз 2026
K1	1609620	1581567	1553514	1525461	1497408
K2	77	77	77	77	77
K3	2314,333	2314,333	2314,333	2314,333	2314,333
K4	39	39	39	39	39
K5	250725,2	272544,5	294363,7	316183	338002,2
K6	328897	356720	384543	412366	440189
K7	4783	4783	4783	4783	4783
K8	5409	5409	5409	5409	5409

Джерело: розраховано авторами

поступово зменшується за всіма моделями, досягнувши 5,4 млн тонн у 2026 році за GARCH та Random Forest. Це свідчить про екологічну стабільність, яка може бути наслідком як зниження промислової активності, так і впровадження більш чистих технологій.

Таким чином, для забезпечення сталого розвитку Запорізького регіону необхідно вирішувати демографічні виклики, сприяти цифровізації, підтримувати індустріальний розвиток, збільшувати експортний потенціал та активізувати екологічні ініціативи. Прогнози свідчать, що найбільш перспективним є сценарій інтенсивного економічного зростання за умови належної політики у сфері інвестицій, інновацій та інтеграції до світової економіки.

Висновки. У сучасних умовах економічні процеси України піддаються впливу численних факторів, включаючи військовий стан, інфляцію, логістичні труднощі, екологічні проблеми, соціальну нерівність, депресивність промислових регіонів та масову еміграцію. Особливо значущими є міграційні процеси, викликані війною, що призвели до зменшення людського капіталу, дефіциту робочої сили, зміни структури населення та зниження валового регіонального продукту в постраждалих регіонах. Для забезпечення сталого розвитку країни необхідно зосередитись на збереженні людського капіталу та впровадженні цифрових технологій. Прогнозування часових рядів є популярним напрямом досліджень для короткострокового та середньострокового періодів. Існує два основні підходи до аналізу часових рядів: класичні методи, такі як ARIMA і GARCH, розроблені на основі методології Бокса та Дженкінса, та методи інтелектуального аналізу даних, серед яких нейронні мережі (ANN), опорна векторна машина (SVM), методи k-найближчих сусідів (kNN) та випадкові ліси (Random Forest). Для реалізації цих підходів найчастіше використовуються програми RStudio, MATLAB та Excel (з доповненнями на зразок XLSTAT). Однак для зручності та економії ресурсів доцільно застосовувати хмарні інструменти, такі як Google Colab або Kaggle Notebooks, які є безкоштовними, простими у використанні й не вимагають встановлення. Аналіз наукових праць за період 2018–2023 років, виконаний за допомогою інструмента SciVal бази Scopus, свідчить про зростаючу увагу дослідників до оцінки індикаторів сталого розвитку через цифровізацію. Основними методами прогнозування індикаторів виступають ARIMA, GARCH і Random Forest. Для практичного аналізу використовувалися дані, що відображають динаміку сталого розвитку регіонів України, зібрані в рамках науково-дослідних робіт. Особливу увагу було приділено показникам Запорізького регіону, серед яких чисельність населення, доступ до інтернету, розвиток цифрової інфраструктури,

обсяг промислового виробництва, валовий регіональний продукт (ВРП) та інші. Модель GARCH демонструє стабільне зростання значень усіх показників у період з 2022 по 2026 рік, зберігаючи поступове збільшення тренду. Модель Random Forest, навпаки, передбачає значні коливання показників, включаючи різке зростання деяких значень (наприклад, K5 і K6), що свідчить про її чутливість до трендів у даних. Модель ARIMA характеризується більш консервативними прогнозами, зокрема стабільними значеннями для низки показників (K2, K3, K4, K7, K8) та помірним зростанням інших (K1, K5, K6). Таким чином, вибір моделі для прогнозування залежить від конкретних завдань і потреб дослідника. Якщо мета – отримати стабільні довгострокові оцінки, ARIMA виглядає більш доцільною. У випадках, коли важлива адаптація до динамічних змін, можна застосовувати Random Forest або GARCH, залежно від специфіки часових рядів. Хмарні середовища для аналізу даних значно спрощують процес моделювання й аналізу, роблячи їх доступними для ширшого кола користувачів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Kuzior A., Arefieva O., Vovk O., Brožek P. Innovative Development of Circular Systems While Ensuring Economic Security in the Industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2022. Vol. 8. No. 3. P. 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/joitmc8030139>
2. Liamzin A.O., Lozova G.M., Klymenko V.V., Yeroshenko O.R. Modeling the process of ensuring environmental sustainability of the airport as a functional component of socio-technical systems. *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415. No. 1. P. 012083. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012083>
3. Martín Gómez A.M., Aguayo González F., Marcos Bárcena M. Smart eco-industrial parks: A circular economy implementation based on industrial metabolism. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 135. P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.007>
4. Xenou E., Ayfantopoulou G., Giannaki M., Royo B. SPROUT case studies: Assessing future mobility scenarios by following a city-led consequence analysis framework – the case of Budapest and Tel Aviv city. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 359–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.415>
5. Onaolapo A.K., Sharma G., Bokoro P.N., Adefarati T., Bansal R.C. A comprehensive review of the design and operations of a sustainable hybrid power system. *Computers and Electrical Engineering*. 2023. Vol. 111. P. 108954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108954>
6. Mhamdi R., Gtari M. Tracking the trajectory of frankia research through bibliometrics: Trends and future directions. *Canadian Journal of Microbiology*. 2024.

Vol. 70(12). P. 551–564. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjm-2024-0030> (accessed: 25.12.2024).

7. Carvalho Marques M. d., Mohamed A.A., Feitosa P. Sustainable development goal 6 monitoring through statistical machine learning – Random forest method. *Cleaner Production Letters*. 2024. P. 100088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2024.100088> (accessed: 25.12.2024).

8. Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley and Sons. 2008. URL: <https://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://elib.vku.udn.vn/bitstream/123456789/2536/1/1994.%20Time%20Series%20Analysis-Forecasting%20and%20Control.pdf> (accessed: 25.12.2024).

9. Witten I.H., Frank E., Hall M.A., Pal C.J. *Data mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. (fourth ed.), Morgan Kaufmann, Burlington, MA. 2016. URL: <https://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://thuviensso.hoasen.edu.vn/bitstream/handle/123456789/9088/Contents.pdf?sequence=3>

10. Musa K.I., Mansor W.N. A.W., Hanis T.M.R, RStudio and RStudio Cloud. *Data Analysis in Medicine and Health using R*. New York, 2023. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003296775-1> (accessed: 26.12.2024).

11. Publishing M.G. *Don't Panic! I'm a Professional MATLAB Engineer : Customized 100 Page Lined Notebook Journal Gift for a Busy MATLAB Engineer: Far Better Than a Throw Away Greeting Card*. Independently Published, 2020. 102 p.

12. Johary R., Révillion C., Catry T., Alexandre C., Mouquet P., Rakotoniaina S., Pennober G., Rakotondraompiana S. Detection of Large-Scale Floods Using Google Earth Engine and Google Colab. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(22). P. 5368. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15225368> (accessed: 26.12.2024).

13. Preda G. *Developing Kaggle Notebooks: Pave Your Way to Becoming a Kaggle Notebooks Grandmaster*. Packt Publishing, Limited, 2023.

14. da Silva L. F., de Araujo Costa I. P., de Oliveira T.E.S., Rangel G.C., Lucas F.F., da Costa L.M.A., de Pina Correia J. V., de Araújo Costa A. P., dos Santos M. Demand Forecasting for Steel Company Spare Items with Time Series Templates. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 242. P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.08.230> (accessed: 26.12.2024).

15. Safiullin M., Elshin L., Abdukaeva A. Arch / garch-modeling in the study of the dynamics of the cryptocurrency market volatility (the bitcoin case). *Obshchestvo i ekonomika*. 2019. No. 11. P. 78–89. DOI: <https://doi.org/10.31857/s020736760007591-9> (accessed: 26.12.2024).

16. Alfari L., Firdaus A.N., Nyuswantoro U.I., Siagian R.C., Muhammad A.C., Hassan R., Aunzo Jr., R.T., Ariefka R. Predicting Ocean Current Temperature Off the East Coast of America with XGBoost and Random Forest Algorithms Using Rstudio. *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*. 2024. Vol. 29. No. 2. P. 273–284. DOI: <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.29.2.273-284> (accessed: 26.12.2024).