

ОСНОВНІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ ШВИДКОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОГРЕСУ НА ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗВИТОК, ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЮ

В.А. Назаренко, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

E-mail: volodnz@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Індустрія 4.0 (Industry 4.0) принесла трансформаційні зміни в економіку держав, екологічну ситуацію та землекористування, стимулюючи розвиток та інновації за допомогою сучасних технологій IoT, AI та хмарних обчислень. Вона сприяє економічному зростанню, розвитку циклічної (circular) економіки та швидкому впровадженню технологій відновлюваної енергетики. Однак такі досягнення створюють ряд проблем, включаючи збільшення відходів електронної продукції, підвищений попит на енергію та поглиблюють соціально-економічну нерівність. У дослідженні використовується комплексний підхід, який синтезує ідеї вже висвітлені у найсучасніших наукових та прикладних джерелах інформації з використанням їх глибокого порівняльного аналізу. Такі джерела включають опубліковані статті, тематичні дослідження та галузеві звіти, присвячені впливу Індустрії 4.0 на урбанізацію, сталий розвиток та економічне зростання. Дані таких досліджень були проаналізовані для виявлення тенденцій, проблем і прийняття наступних дієвих рішень.

Індустрія 4.0 спричинила розробку нових бізнес-моделей та підвищує операційну ефективність процесів завдяки взаємозв'язку та аналітиці. Технології відновлюваної енергетики, точне землеробство та моніторинг викидів у режимі реального часу демонструють широкі можливості у екологічному потенціалі цієї революції. Однак, залежність від потреби у наявності мережі центрів обробки

даних і все більша потреба у використанні природних ресурсів і рідкоземельних металів зокрема (наприклад, літію) підкреслюють ріст екологічних проблем. Дані, наведені у статті, ілюструють міжгалузевий вплив Індустрії 4.0 і пропонують рамки для стійких виробничих процесів.

У матеріалах дослідження детально описаний внесок Індустрії 4.0 у забезпечення циклічної (circular) економіки та покращення управління ресурсами. Політики та бізнес повинні зважено підійти до вирішення питань подвійного значення впливу Індустрії 4.0 шляхом впровадження чіткого регулювання утилізації електронних відходів, інвестування у відновлювані джерела енергії та забезпечення справедливих соціально-економічних умов для населення. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на питаннях накопичення та збереження енергоресурсів, інноваціях у сфері міського планування та зменшенні диспропорції між великими корпораціями і малими та середніми підприємствами (бізнесом). Індустрія 4.0 змінює глобальні системи, пропонуючи величезний потенціал для сталого розвитку. Досягнення цієї мети вимагає збалансованого підходу, який узгоджує технологічний прогрес з екологічною та соціальною відповідальністю.

Ключові слова: урбанізація, промисловість 4.0, вплив на навколишнє середовище, економічне зростання, техногенний вплив, економіка.

Актуальність. 21 століття стало свідком швидкого технологічного прогресу, який змінив економіку, перевизначив нормативи землекористування та глобально змінив навколишнє середовище. Інновації у галузі штучного інтелекту, відновлюваних джерел енергії, біотехнологій та цифрових технологій стали невід'ємною частиною промислового зростання та суспільного розвитку. Наприклад, системи відновлюваної енергетики, такі як сонячна та вітрова енергія, різко скоротили викиди парникових газів при виробництві енергії. У той же час, цифрові технології, такі як IoT (Інтернет речей), оптимізували ланцюжки поставок

і оптимізували міське планування. У розвинених економіках розумні підприємства, що використовують технології Індустрії 4.0, значно підвищили продуктивність, зменшили рівень відходів та забезпечили прогнозоване технічне обслуговування з використанням штучного інтелекту. Тим часом мобільні технології та Інтернет речей покращили сільськогосподарські практики у країнах, що розвиваються, надаючи фермерам дані у режимі реального часу про погоду, стан ґрунту та управління посівами, покращуючи врожайність та підвищили ефективність використання ресурсів. Однак ці досягнення також принесли і проблеми, включаючи зростання електронних відходів через швидке оновлення пристроїв та екологічні втрати від видобутку рідкоземельних хімічних елементів для акумуляторів та електроніки.

Слід зазначити, що хмарні обчислення є наріжним каменем Індустрії 4.0. Повна реалізація розумних виробництв вимагає нових рішень та інтеграції інженерії, оптимізації ланцюга поставок, виробництва, продажів та обслуговування. Хмарні технології дозволяють ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги даних, одночасно знижуючи початкові витрати для малих і середніх виробників, дозволяючи їм правильно розподіляти свої потреби та масштабувати операції. Забезпечуючи гіперперсоналізацію за допомогою даних про клієнтів у режимі реального часу та алгоритмів штучного інтелекту, хмарні обчислення допомагають компаніям краще задовольняти потреби клієнтів, незалежно від фізичних можливостей об'єкта. Така цифрова трансформація особливо корисна для малих і середніх компаній у вирішенні сучасних промислових викликів.

Індустрія 4.0, четверта промислова революція, є прикладом таких досягнень, інтегруючи автоматизацію, швидкий обмін даними та взаємозв'язок між галузями. Яскравими прикладами є використання прогнозованого технічного обслуговування на основі штучного інтелекту у виробництві, зниження експлуатаційних витрат і витрат ресурсів, а також розгортання автономних транспортних засобів у логістиці

для підвищення ефективності. Незважаючи на численні переваги, включаючи розумне виробництво та інтеграцію відновлюваних джерел енергії, технології Індустрії 4.0 приносять складності, такі як збільшення електронних відходів та потреб в енергії, що вимагає збалансованого підходу до сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасна література широко висвітлює трансформаційний потенціал і проблеми, пов'язані з сучасними технологіями. Наприклад, Dwivedi et al. (2022) досліджують інтеграцію циклічної (circular) економіки з Індустрією 4.0, наголошуючи на її ролі у стійких виробничих системах [1]. Ghobakhloo et al. (2024) розширюють дослідження такої перспективу, розглядаючи технології Індустрії 5.0, розглядаючи питання економічної, соціальної та екологічної стійкості [2]. Подібним чином Javaid et al. (2022) визначають, як впровадження сучасних технологій підвищує екологічну стійкість, пропонуючи шляхи для скорочення викидів і відходів [3]. Nazarenko et al. (2024) також наголошують на питаннях екологічного моніторингу при дослідженні життєдіяльності міста на основі Інтернету речей, ілюструючи важливість даних у режимі реального часу для оптимізації управління навколишнім середовищем [4]. Вплив Індустрії 4.0 на навколишнє середовище багатогранний. Oláh et al. (2020) та Hoosain et al. (2020) наголошують, що хоча інновації у відновлюваній енергетиці та управлінні відходами позитивно впливають на сталий розвиток, проте такі проблеми, як високий рівень споживання енергії центрами обробки даних та збільшення видобутку ресурсів, залишаються поширеним явищем [5, 6]. Такі дослідження у сукупності наголошують на необхідності комплексних стратегій для максимізації технологічних переваг при одночасному пом'якшенні негативних наслідків на навколишнє середовище. Крім того, Wuest et al. (2022) аналізують комплексний вплив інтелектуальних виробничих технологій, висвітлюючи взаємозв'язок економічних, екологічних і соціальних вимірів у сприянні сталому зростанню [7]. Тоді як Jabbour (2020) представив кейс розвитку циркулярної економіки в рамках Індустрії 4.0 на прикладі ринку сталі [8].

Мета дослідження. У статті аналізуються економічні, земельні та екологічні наслідки швидкого технологічного прогресу, з акцентом уваги на їхній подвійній природі. Узагальнюючи останні дослідження, стаття має на меті виявити ключові фактори, що впливають на ці процеси, та запропонувати дієві рекомендації щодо балансування між економічним зростанням та екологічною стійкістю. Досягнення поставленої мети тісно пов'язане із реалізацією таких процесів, як інформування про політичні рішення щодо міського планування, керівництво галузевими практиками для впровадження сучасних технологій та вирішення глобальних проблем, таких як запобігання змінам клімату та виснаження ресурсів. Такі ключові слова, як урбанізація, Індустрія 4.0, вплив на навколишнє середовище та технологічний слід, супроводжую цю дискусію.

Матеріали і методи дослідження. Дані дослідження використовує комплексний дослідницький підхід, що поєднує ретельний огляд літератури та порівняльний аналіз останніх публікацій. При проведенні порівняльного аналізу існуючих досліджень увага була зосереджена на виявленні схожих тем і дуже контрастних висновках при проведенні ключових досліджень за даною темою, з особливим акцентом на методологіях, географічному охопленні, відповідності Індустрії 4.0 (Industry 4.0) та сталому розвитку. Ключові джерела включали рецензовані статті, тематичні дослідження та галузеві звіти, вибрані на основі їх впливу на цитування, року публікації та прямого відношення до економічного, земельного та екологічного питань. Також були використані та проаналізовані дані з багатьох дослідницьких баз даних для виявлення тенденцій, проблем та найкращих практик. Наприклад, роль IoT при розумному плануванні міст була перехресно досліджена з його впливом на навколишнє середовище. Наведені у статті структуровані дані узагальнюють економічні та екологічні показники, пов'язані з технологічним прогресом, пропонуючи чітке візуальне представлення результатів.

Рисунок 1 ілюструє прогрес від використання ручної праці та механізації в Індустрії 1.0 до розширеної інтеграції віртуальних і фізичних систем в Індустрії 4.0. Індустрія 4.0 характеризується злиттям реального та віртуального світів, інтеграцією інтелектуальних цифрових технологій у виробничі та промислові процеси. До них належать промислові мережі IoT, штучний інтелект, Big Data, робототехніка та автоматизація, які разом сприяють ефективності міського та промислового розвитку та інноваціям.



Рис. 1. Чотири етапи промислової революції від 1,0 до 4,0 (матеріали отримані із відкритих джерел)

Рисунок 2 ілюструє п'ять ключових моментів інтелектуальних системних послуг, важливих для Індустрії 4.0, це: аналітика, управління ризиками, прогнозування, аналітика та ефективність у режимі реального часу. Ці взаємопов'язані компоненти забезпечують безперебійну роботу аналітичних програмних систем завдяки використанню передової аналітики даних та штучного інтелекту для прогнозування важливих трендів, зниження ризиків та оптимізації ефективності виробничих процесів у режимі реального часу. Разом вони складають основу системи комунікації Індустрії 4.0, покращуючи процес прийняття рішень та оперативну гнучкість у різних галузях.



Рис. 2. Комунікація (технології зв'язку) та обробка даних в Індустрії 4.0 (підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень)

Використаний у дослідженні підхід узгоджується із проведенням якісного порівняльного аналізу (QCA), який досліджує те, як різні умови впливають на конкретні результати. QCA особливо корисний для вивчення складних явищ шляхом порівняння кількох факторів для виявлення закономірностей і їх причинно-наслідкових зв'язків. У цьому дослідженні QCA сприяє вивченню того, як різні технологічні досягнення впливають на питання економіки, землекористування та екологічні фактори, пропонуючи точне розуміння взаємодії між цими елементами.

Результати дослідження та їх обговорення. Технології відновлюваної енергетики, такі як вітрова, сонячна енергії та гідроелектроенергія, відіграли вирішальну роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату шляхом значного скорочення викидів вуглецю. Інструменти точного землеробства, включаючи сучасну сільськогосподарську техніку та дрони з GPS-керуванням, дозволяють ефективно використовувати ресурси, підвищуючи продуктивність та знижуючи експлуатаційні витрати.



Рис. 3. Індустрія 4.0: нові можливості та міжгалузеві переваги (підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень)

Діаграма (Рис. 3) окреслює трансформаційні можливості, які Індустрія 4.0 приносить різним секторам. Ключові компоненти включають розробку нових бізнес-моделей та аналітику ринку для оптимізації виробництва, які допомагають підприємствам та організаціям залишатися конкурентоспроможними та ефективними. Замкнутий цикл виробництва, інтеграція та покращені можливості мережевого\безпроводного з'єднання свідчать про те, що вони є критично важливими факторами сталого розвитку. Крім того, прогрес у сфері безпеки та збереження природних ресурсів демонструє здатність Індустрії 4.0 зміцнювати стійкість та знижувати ризики у різних галузях.

Індустрія 4.0 сприяє впровадженню економіки замкненого циклу, сприяючи повторному використанню продукції та сировини, відновленню та переробці матеріалів. Аналітика великих баз даних та мережі IoT покращують відстеження життєвого циклу виробництва продукції, зворотну логістику та відновлення ресурсів, а аналітика на основі штучного інтелекту допомагає розробляти екологічні продукти, які мінімізують відходи та полегшують їх переробку. Використовуючи великі бази дані в режимі реального часу, компанії можуть відстежувати викиди, оптимізувати використання енергії та розробляти стратегії для зменшення вуглецевого сліду. Однак такі проблеми, як зростаюча кількість електронних відходів, видобуток рідкоземельних металів і високі вимоги до якості енергії з боку центрів обробки даних і майнінгу криптовалют, підкреслюють важливість стійких практик.

1. Роль Індустрії 4.0 у відновлюваній енергетиці та циклічній економіці *

Ключова область	Технологічний внесок	Вплив
Відновлювальна енергетика	Інтеграція вітрових, сонячних та гідроелектричних систем	Скорочення викидів вуглецю
Точне землеробство	Трактори, с.-г. техніка, дрони з GPS-навігацією	Підвищення продуктивності та ефективності використання ресурсів
Циркулярна економіка	Великі дані, IoT та штучний інтелект	Покращене повторне використання матеріалів та зменшення відходів
Моніторинг викидів	Збір даних та аналітика в режимі реального часу	Розробка енергоефективних стратегій
Поводження з електронними відходами	Зворотна логістика, відновлення ресурсів	Зменшення забруднення навколишнього середовища

* підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень

Рисунок 4 підкреслює широкий вплив Індустрії 4.0 у трьох ключових сферах: соціальній, економічній та екологічній. У соціальному вимірі вона розглядає важливі фактори, такі як позитивні зрушення на ринку праці, прогрес у сфері охорони здоров'я та добробуту, а також удосконалення систем мобільності. З економічної точки зору, Індустрія 4.0 сприяє створенню нових ринків, стимулює ріст нових інвестицій та надає широкі можливості з розширення бізнесу. З екологічної точки зору, вона підкреслює роль технологічних досягнень в оптимізації використання різноманітних видів енергії, управлінні рідкісними природними ресурсами та вирішенні проблем викидів за допомогою інноваційної політики та технологічних рішень. Усі разом ці компоненти ілюструють цілісний та трансформаційний характер Індустрії 4.0 з точки зору міського розвитку та промислової еволюції.

Соціальні	Економічні	Екологічні
• Ринок праці • Охорона здоров'я та добробут • Мобільність	• Новий ринок збуту • Нові інвестиції • Нові види діяльності та розширення	• Енергія • Природні ресурси (рідкісні та життєво важливі). • Нові типи викидів та політика

Рис. 4. Індустрія 4.0 Міжгалузевий вплив та значні компоненти
(підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень)

Технологічний прогрес значно сприяє економічному зростанню завдяки підвищенню ефективності та фінансовому стимулюванню інновацій. Технології Індустрії 4.0, такі як IoT, штучний інтелект та автоматизація, забезпечують більш інтелектуальні виробничі процеси, знижують витрати та підвищують їх продуктивність. У таблиці 2 узагальнено основні економічні переваги та проблеми.

2. Можливості та вигоди економічного розвитку завдяки Індустрії 4.0 *

Економічні показники	Переваги	Проблеми
Підвищення продуктивності	Автоматизація знижує експлуатаційні витрати	Початкові інвестиційні витрати високі
Створення ринку	Новітні технології створюють нові галузі	Витіснення робочих місць через автоматизацію
Інновації в енергоефективності	Низьке споживання енергії на виробництві	Залежність від невідновлюваної енергії на ранніх етапах

* підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень

Незважаючи на низку зазначених переваг, вплив технічного прогресу на навколишнє середовище є значним. Дата-центри та операції з видобутку криптовалют є дуже енергоємними та потребують значних витрат енергії. Крім того, електронні відходи та виснаження природних ресурсів створюють серйозні

екологічні загрози. У таблиці 3 представлено їх основні впливи на навколишнє середовище.

3. Вплив на навколишнє середовище внаслідок Індустрії 4.0 *

Екологічні показники	Позитивний вплив	Негативні наслідки
Інтеграція відновлювальних джерел енергії	Зменшує викиди вуглецю та пом'якшує зміну клімату	Обмежена доступністю ресурсів для відновлюваних джерел енергії
Інновації в управлінні відходами	Сприяє переробці відходів та економії замкненого циклу	Високий рівень електронних відходів
Землекористування та урбанізація	ІоТ-технології оптимізують містобудування	Руйнування та забруднення середовища існування внаслідок видобутку корисних копалин

* підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень

Швидка урбанізація, зумовлена технологічним прогресом, змінила моделі землекористування. Інтернет речей та інноваційні технології дозволяють ефективно планувати розвиток міст, оптимізувати управління дорожнім рухом та використання енергії. Однак, нерегульоване зростання часто призводить до негативних наслідків на оточуюче середовища, умови проживання в містах та збільшення забруднення. Наприклад, видобуток сировини для пристроїв ІоТ призвів до значного погіршення стану навколишнього середовища. Назаренко В.А. (2020) висвітлює економічні аспекти землекористування у приміських зонах, наголошуючи на необхідності оптимальних рішень для регулювання життя міст [9]. Крім того, урбанізація та вплив розростання міст на сільськогосподарські землі виявляє нагальну потребу в інтеграції зелених зон у міське планування.

Рисунок 5 ілюструє інноваційні виробничі процеси, що стали можливими завдяки Індустрії 4.0, підкреслюючи взаємозв'язок виробництва, технології та їх впливу на навколишнього середовища. У сегменті «Виробництво» особлива увага приділяється інтеграції інтелектуальних систем аналітики, взаємозв'язку усіх елементів та спостереження, які оптимізують роботу та підвищують її ефективність.

У розділі «Технології» представлено досягнення в галузі обробки даних, портативних і доступних пристроїв керування, а також оптимізації матеріалів, що в сукупності сприяє підвищенню продуктивності та гнучкості виробництва. А у складовій «Навколишнє середовище» зосереджено увагу на сталому управлінні ресурсами, включаючи відновлення та практичне використання, контроль відходів та викидів, а також оптимізацію витрат енергії за рахунок відновлюваних джерел та зниження рівня втрат. Разом ці елементи утворюють цілісну основу, яка дозволяє переосмислити економіку сучасного виробництва.



Рис. 5. Новий економічний виробничий процес Індустрії 4.0 (підготовлено Назаренко В.А. на основі даних власних досліджень)

Технологічний прогрес у 21 столітті створює як можливості, так і нові виклики. У дослідженні наведено шляхи впровадження економіки замкненого циклу та вирішення проблеми електронних відходів за допомогою зворотної логістики та відновлення ресурсів. З екологічної точки зору, інтеграція відновлюваних джерел енергії та моніторинг викидів у режимі реального часу демонструють потенціал для зменшення вуглецевого сліду та оптимізації управління ресурсами. Наприклад, такі проекти, як німецький *Energiewende*,

інтегрували вітрову та сонячну енергію в енергетичну мережу, зменшуючи залежність країни від викопного палива. Аналогічним чином, системи моніторингу викидів з підтримкою Інтернету речей, такі як ті, що використовуються Shell, надають дані про викиди вуглецю в режимі реального часу, що дозволяє компаніям виявляти неефективність і впроваджувати заходи з енергозбереження.

Наведені приклади підкреслюють, як технології Індустрії 4.0 сприяють відчутному прогресу на шляху до стійкої екологічної ситуації. Однак такі проблеми, як високі вимоги до якості енергії в центрах обробки даних і видобуток рідкоземельних металів, повинні бути вирішені для пом'якшення негативного впливу на навколишнє середовище. Політики та керівник різних галузей повинні співпрацювати для:

- забезпечення дотримання правил щодо збереження та утилізації електронних відходів і заохочуйте їх переробку, гарантуючи, що небезпечні матеріали не завдають шкоди екосистемам або здоров'ю людей;
- інвестування в енергоефективні технології та відновлювані джерела енергії, які зможуть значно зменшити залежність від викопного природного палива та знизити вуглецеві викиди;
- заохочувати економіку замкненого циклу (circular economies) з метою мінімізації виснаження усіх видів ресурсів і просування сучасних методів виробництва.

Висновки і перспективи. Результати дослідження, представлені у статті, підкреслюють подвійні впливи технологій Індустрії 4.0, які одночасно сприяють економічному зростанню та призводять до значних екологічних викликів. У питаннях економіки Індустрія 4.0 сприяє інноваціям за допомогою сучасних цифрових систем аналітики на основі ШІ, комунікації та автоматизації, створюючи нові бізнес-моделі та ринки. Наприклад, в автомобільній промисловості такі компанії, як Tesla, використовують технології Industry 4.0, включаючи IoT та AI, для підвищення ефективності виробництва, інтеграції систем відновлюваної енергії

та контроль за використанням транспортних засобів у режимі реального часу. Подібним чином, технології точного землеробства, такі як електронні датчики та дрони з підтримкою Інтернету речей, дозволяють фермерам оптимізувати врожайність сільськогосподарських культур та мінімізувати відходи. У виробництві на «розумних заводах», що впроваджені Siemens, використовують штучний інтелект і робототехніку для оптимізації операцій, зниження витрат і адаптації до динамічних вимог ринку. Представлені моделі досліджень, такі як «Міжгалузевий вплив Індустрії 4.0» та «Новий економічний виробничий процес», ілюструють, як ці технології оптимізують технологічні операції, підвищують продуктивність та сприяють цикловому виробництву.

Крім того, соціальні виміри, такі як зміни на ринку праці та соціально-економічні нерівності, вимагають спільних зусиль для забезпечення рівних вигод між секторами та регіонами. Ефективні стратегії включають програми перекваліфікації та підвищення кваліфікації, такі як ті, що впроваджуються такими компаніями, як Amazon, які пропонують ініціативи з розвитку робочої сили для підготовки співробітників до ролей у передових технологічних секторах. Державно-приватне партнерство, як-от німецька система дуальної освіти, поєднує навчання в класі з навчанням на робочому місці, зменшуючи прогалини в навичках і забезпечуючи адаптивність робочої сили. Крім того, дослідження таких країн, як Швеція, підкреслюють переваги підтримуваних урядом ініціатив з перекваліфікації, які допомагають працівникам перейти у високотехнологічні галузі, пом'якшуючи скорочення робочих місць, спричинене автоматизацією. Крім того, цільові державні субсидії та гранти для малих та середніх підприємств (МСП) можуть допомогти подолати соціально-економічні диспропорції, надаючи їм доступ до передових технологій Індустрії 4.0, сприяючи економічній стійкості. Компанії можуть зробити свій внесок, інтегрувавши сталий розвиток у свою діяльність, зосередившись на стійких ланцюжках поставок і використовуючи дані в режимі реального часу для оптимізації використання ресурсів.

Для прийняття відповідних законів, прийняття відповідних рамок, які стимулюють зелені технології та встановлюють суворіші екологічні стандарти, допоможе подолати розрив між інноваціями та сталим розвитком. Крім того, соціальні виміри, такі як зміни на ринку праці та соціально-економічні нерівності, вимагають спільних зусиль для забезпечення рівних умов між галузями та регіонами. Компанії можуть зробити свій внесок, впроваджуючи сталий розвиток у свої операційні моделі, такі як впровадження систем замкнутого циклу та скорочення відходів на кожному етапі виробництва.

Майбутні дослідження повинні приділяти першочергову увагу інноваціям у сфері збереження енергії, таким як нові технології виготовлення акумуляторів з максимальною ємністю та енергоефективністю. Також необхідні негайні рішення для запровадження відновлюваної енергетики, такі як системи зберігання енергії на рівні мережі, щоб забезпечити безперебійну інтеграцію сонячної та вітрової енергії. Міське планування має бути зосереджене на проектуванні розумних міст, які інтегрують системи з на основі розумних пристроїв (Інтернету речей) для управління дорожнім рухом, утилізації відходів, розподілу енергії тощо. Крім того, вивчення та запровадження вертикального землеробства та зелених дахів може допомогти вирішити проблему озеленення при обмеженні міських територій, одночасно підвищуючи стійкість. Міжсекторальна співпраця забезпечить ці реалізацію таких досягнень та сприятиме відновленню якості навколишнього середовища при збереженні рівня благополуччя суспільства.

Список використаної літератури

1. Dwivedi, A., Moktadir, M. A., Jabbour, C. J. C., & de Carvalho, D. E. Integrating the circular economy and industry 4.0 for sustainable development: Implications for responsible footwear production in a big data-driven world // Technological Forecasting and Social Change. 2022. Vol. 175. Article 121335. DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121335.

2. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M., Rejeb, A., Foroughi, B., & Nikbin, D. Beyond Industry 4.0: a systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability // *Asia-Pacific Journal of Business Administration*. 2024. DOI: 10.1108/APJBA-04-2023-0123.
3. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability // *Sustainable Operations and Computers*. 2022. Vol. 3. P. 203–217. DOI: 10.1016/j.susoc.2022.08.002.
4. Nazarenko, V., Martyn, A., Klikh, L., & Pashchenko, O. Green metrics: internet of things based ecological monitoring and management for sustainable urban living in Kyiv // *Economic science for rural development* 2024. 2024. Vol. 220. P. 45–56. DOI: 10.22616/ESRD.2024.58.022.
5. Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. Impact of Industry 4.0 on environmental sustainability // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 11. Article 4674. DOI: 10.3390/su12114674.
6. Hoosain, M. S., Paul, B. S., & Ramakrishna, S. The impact of 4IR digital technologies and circular thinking on the United Nations sustainable development goals // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 23. Article 10143. DOI: 10.3390/su122310143.
7. Wuest, T., Romero, D., Khan, M. A., & Mittal, S. The triple bottom line of smart manufacturing technologies: An economic, environmental, and social perspective // *The Routledge Handbook of Smart Technologies* / Eds. A. Choudhary, S. Oyekanmi. Routledge, 2022. P. 312–332. DOI: 10.4324/9780367549451-18.
8. Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Wong, C. W., Jugend, D., Jabbour, A. B. L. D. S., Seles, B. M. R. P., & da Silva, H. M. R. First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies // *Resources Policy*. 2020. Vol. 66. Article 101596. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101596.

9. Nazarenko, V. Economic aspects of land use in Kyiv and suburban areas // Bioeconomics & Agrarian Business (Біоекономіка та Аграрний Бізнес). 2020. Vol. 11. Issue 3. P. 33–42. DOI: 10.31548/bioeconomy2020.03.004.

References

1. Dwivedi, A., Moktadir, M. A., Jabbour, C. J. C., & de Carvalho, D. E. (2022). Integrating the circular economy and Industry 4.0 for sustainable development: Implications for responsible footwear production in a big data-driven world. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121335. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121335>.
2. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Fathi, M., Rejeb, A., Foroughi, B., & Nikbin, D. (2024). Beyond Industry 4.0: A systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental, and economic sustainability. *Asia-Pacific Journal of Business Administration*. <https://doi.org/10.1108/APJBA-04-2023-0123>
3. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.08.001>.
4. Nazarenko, V., Martyn, A., Klikh, L., & Pashchenko, O. (2024). Green metrics: Internet of Things-based ecological monitoring and management for sustainable urban living in Kyiv. *Economic Science for Rural Development*, 58, 220-230. <https://doi.org/10.22616/ESRD.2024.58.022>.
5. Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability*, 12(11), 4674. <https://doi.org/10.3390/su12114674>.

6. Hoosain, M. S., Paul, B. S., & Ramakrishna, S. (2020). The impact of 4IR digital technologies and circular thinking on the United Nations sustainable development goals. *Sustainability*, 12(23), 10143. <https://doi.org/10.3390/su122310143>.
7. Wuest, T., Romero, D., Khan, M. A., & Mittal, S. (2022). The triple bottom line of smart manufacturing technologies: An economic, environmental, and social perspective. In *The Routledge Handbook of Smart Technologies* (pp. 312-332). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367549451-18>.
8. Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Wong, C. W., Jugend, D., Jabbour, A. B. L. D. S., Seles, B. M. R. P., ... & da Silva, H. M. R. (2020). First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging Industry 4.0 technologies. *Resources Policy*, 66, 101596. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101596>.
9. Nazarenko, V. (2020). Economic aspects of land use in Kyiv and suburban areas. *Bioeconomics & Agrarian Business*, 11(3). P. 33–42. <https://doi.org/10.31548/bioeconomy2020.03.004>.

V. Nazarenko

MAIN FACTORS OF ECONOMIC, LAND, AND ENVIRONMENTAL IMPACT DUE TO RAPID TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS

Industry 4.0 has brought transformative changes across economic, environmental, and land use dimensions, driving innovations through IoT, AI, and cloud computing technologies. This revolution fosters economic growth, promotes circular economies, and integrates renewable energy technologies. However, these advancements present challenges, including rising e-waste, energy demands, and socio-economic disparities. The study uses a qualitative research approach, synthesizing insights from recent literature and employing comparative analysis. Sources include peer-reviewed articles, case studies, and industry reports focusing on the impacts of Industry 4.0 on urbanization,

sustainability, and economic growth. Data from these studies have been analyzed to identify trends, challenges, and actionable solutions.

Industry 4.0 facilitates the development of new business models and improves operational efficiency through interconnectivity and analytics. Renewable energy technologies, precision agriculture, and real-time emissions monitoring showcase the environmental potential of this revolution. However, the reliance on data centers and rare earth resources highlights the ecological challenges. Figures in the article illustrate Industry 4.0's cross-industry impacts and propose frameworks for sustainable production processes. Research materials provide details on the contributions of Industry 4.0 in enabling circular economies and improving resource management.

Policymakers and businesses must address the dual nature of Industry 4.0 by implementing e-waste regulations, investing in renewable energy, and ensuring equitable socio-economic benefits. Future research should focus on scalable energy storage, urban planning innovations, and reducing disparities between large corporations and SMEs. Industry 4.0 is reshaping global systems, offering immense potential for sustainable development. Achieving this requires a balanced approach that aligns technological advancements with ecological and social responsibilities.

Keywords: urbanization, industry 4.0, environmental impact, economic growth, technological footprint, economics.