



І. П. Соловій, І. М. Король

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

СТАЛИЙ РОЗВИТОК ЛІСОВОГО СЕКТОРА ЕКОНОМІКИ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ІНДУСТРІЇ 4.0

Для забезпечення сталого розвитку лісового сектора економіки необхідно проаналізувати та синтезувати наявні знання про застосування Індустрії 4.0 у лісовому секторі. З'ясовано, що попередні дослідження в основному зосереджені на окремих технологіях і процесах лісового сектора у контексті застосування Індустрії 4.0. Проведене дослідження зосереджене на ідентифікації тих процесів у межах лісового сектора економіки, які можуть отримати найбільшу користь від впровадження Індустрії 4.0 на засадах сталого розвитку з подальшим аналізом можливості його здійснення й за допомогою яких технологій. Окреслено проблеми лісового господарства, які зумовлені недостатньою наповненістю інформаційної бази та недоліки у забезпеченні її прозорості. Визначено завдання технологій Індустрії 4.0 у вирішенні цих питань. Наведено теоретичні основи переходу до Індустрії 4.0 та її ключові складові, такі як: інтернет речей, штучний інтелект, хмарні обчислення, блокчейн. Проаналізовано впливи технологій Індустрії 4.0 на розвиток лісового сектора економіки та визначено оптимальні стратегії їх впровадження. Особливу увагу приділено аналізу викликів і перешкод на шляху до впровадження Індустрії 4.0 у лісовому секторі, запропоновано рекомендації щодо їх подолання, розглянуто питання підготовки кадрів для роботи з даними технологіями. Визначено конкретні виробничі процеси, які можуть отримати максимальний зиск від впровадження Індустрії 4.0 унаслідок оптимізації ланцюга постачання продукції та підвищення його сталості. Результати дослідження спрямовано як на науковців, так і на практиків, зацікавлених у застосуванні інформаційно-комунікаційних технологій у різних процесах лісового сектора економіки.

Ключові слова: стале лісове господарство; стратегія розвитку; цифровізація; інформаційні технології.

Вступ / Introduction

У Державній стратегії управління лісами України до 2035 року серед основних проблем у сфері лісового господарства згадано "застарілу інформацію про ліси та лісове господарство України", а до стратегічних цілей віднесено "впровадження інформаційних технологій у систему управління лісами та підвищення прозорості даних стосовно лісів і лісового господарства". Для ефективного управління лісами запропоновано підтримувати "...функціонування електронної інформаційної системи у сфері лісового господарства, на якій публічно розміщена інформація про ліси" [4], однак особливої уваги на пріоритети стосовно запровадження новітніх інформаційних технологій в галузі, зокрема для ведення сталого лісового господарства не звернено.

Сьогодні головним здобутком доби цифровізації вважають саме Індустрію 4.0. Її внесок у досягнення цілей сталого розвитку привернув широку увагу з погляду концепцій сталих бізнес-моделей, циркулярної еко-

номії і т.зв. "потрійної нижньої лінії" [11]. Концепція потрійної нижньої лінії (англ. *Triple bottom line*, *TBL* або *3BL*) – це концепція організації бізнесу, згідно з якою підприємці та менеджери повинні приймати до уваги не тільки фінансові показники, але й соціальні та екологічні результати діяльності компанії. Відповідно до цієї концепції бізнес будується на трьох опорах його сталого розвитку – планета (довкілля), люди (соціум) і прибуток (економіка). Проведення аналізу можливостей впровадження концепції індустрії 4.0 у лісовому секторі у контексті досягнення сталості розвитку є актуальним через низку причин, які можна узагальнити в такий спосіб.

1. Лісовий сектор порівняно з іншими є доволі особливим. Окрім широкого спектру потенційного використання, деревина, як сировина, характеризується ширшим набором властивостей та морфології, у порівнянні з сталлю, алюмінієм чи пластиком. Деревина різних лісових порід має відповідне цільове застосування (наприклад, лісопильна продукція чи продукція целюлозно-паперового виробництва), і навіть у межах однієї лісо-

Інформація про авторів:

Ігор Павлович Соловій, д-р екон. наук, професор, кафедра екологічної економіки та бізнесу. Email: soloviy@yahoo.co.uk;

<https://orcid.org/0000-0001-5885-6264>

Ігор Миколайович Король, аспірант, кафедра екологічної економіки та бізнесу. Email: ihor.scott@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0004-0790-7139>

Цитування за ДСТУ: Соловій І. П., Король, І. М. Сталий розвиток лісового сектора економіки з урахуванням технологій Індустрії 4.0. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 1. С. 42–47.

Citation APA: Soloviy, I. P., & Korol, I. M. (2024). The contribution of Industry 4.0 technologies to sustainable development of the forest sector. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(1), 42–47. <https://doi.org/10.36930/40340106>

вої породи певні характеристики деревини можуть змінюватися залежно від географічного розташування лісозаготівель, що робить матеріал придатнішим саме для певних видів використання [17]. Тому і та роль, яку технології Індустрії 4.0 можуть відігравати, залежить від природно-господарських характеристик лісу, особливостей ведення лісового господарства та подальшого використання сировини.

2. Технологічний прогрес підприємств і компаній у лісовому секторі, є достатньо обмеженим, адже виробничі процеси все ще характеризуються великою кількістю ручних операцій, і підприємства не до кінця усвідомлюють потенційні можливості застосування Індустрії 4.0 для сприяння технологічному прогресу в секторі.
3. Одним з ключових принципів Порядку денного ООН з сталого розвитку до 2030 року є стале використання природних ресурсів, зокрема і лісів. Злочинна російська агресія має значні негативні впливи на стан лісів, постачання лісопродукції та зайнятість у лісовому секторі [1].

Тому досягнення технологічного прогресу за напрямом Індустрії 4.0 може сприяти сталому виробництву та споживанню лісопродукції, повоєнному відновленню економіки України та її інтеграції до ЄС на засадах Європейського зеленого курсу.

Об'єкт дослідження – складові сталого розвитку лісового сектора економіки.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення потенційного внеску технологій Індустрії 4.0 у досягнення цілей сталого розвитку лісового сектора економіки.

Мета роботи – ідентифікація новітніх технологій Індустрії 4.0 у межах лісового сектора економіки в контексті сприяння його сталому розвитку.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- дослідити концепцію Індустрії 4.0 у контексті актуальних викликів і завдань, які постали перед лісовим сектором;
- проаналізувати актуальні публікації, які висвітлюють зарубіжний досвід інтегрування новітніх інформаційних технологій у процеси прийняття рішень у лісовому секторі економіки;
- визначити виробничі процеси, які можуть отримати найбільшу користь від впровадження Індустрії 4.0 у розрізі елементів ланцюга постачання продукції;
- обґрунтувати можливості та підходи до впровадження концепції Індустрії 4.0 у лісовому секторі у контексті досягнення сталості його розвитку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Індустрія 4.0 є явищем, яке має і матиме значний вплив у майбутньому як на виробництво, так і на суспільство. Саме тому вона є однією з найважливіших та широко обговорюваних тем у сучасній науковій літературі. Індустрія 4.0 ґрунтується на впровадженні низки технологій, які дають змогу збирати, обмінюватися даними та аналізувати їх в режимі реального часу, пов'язувати кіберпростір з реальним середовищем та створювати нові цифрові виробничі системи [6]. Одним із секторів, де технології Індустрії 4.0 уже знайшли застосування і мають значний потенціал, є лісовий сектор. Низка науковців досліджує ключові особливості та переваги впровадження технологій Індустрії 4.0 у лісовому секторі. Зокрема дослідження Murmura & Bravi, L. (2018) зосереджене на італійській деревообробній та меблевій промисловості з метою вивчити інвестування компаній у технології адитивного виробництва, щоб залишатися конкурентоспроможними на своїх базових ринках, що дало змогу виявити наявні та потенційні сталі переваги

і обмеження впровадження 3D-друку в цьому секторі [13]. Дослідження Zhang et al. (2019) зосереджене на можливостях своєчасного виявлення лісових пожеж за допомогою аналізу звукового спектру на основі технології інтернету речей [18]. Guirado et al. (2020) обґрунтували використання нових безкоштовних автоматичних інструментів із використанням моделей на основі згорткових нейронних мереж із дуже високою роздільною здатністю та безкоштовних повітряних і супутникових зображень для кількісної оцінки деревного покриття лісів у посушливих регіонах на глобальному рівні [9]. Molinaro & Orzes (2022) [12] здійснили системний аналіз літератури для того, щоб окреслити потенціал застосування технології Індустрії 4.0 на всіх етапах лісокористування – від лісової ділянки до готової продукції. Feng & Audy (2020) запропонували структуру для забезпечення цілісного уявлення про лісове господарство на засадах Індустрії 4.0 з охопленням окремих елементів ланцюга постачання деревини [8].

У дослідженні Zhang et al. (2020) наголошено, що величезна кількість даних, згенерованих у процесі охоплення ланцюга постачання деревини, можна використати для вилучення відповідної інформації та удосконалення процесу управління всім ланцюгом постачання – від лісових ділянок до виробництва лісопродукції [19]. Аналогічно, застосовані нові технології можуть також створити кіберфізичне середовище для проектування та виробництва нових виробів з деревини, оптимізуючи в такий спосіб відповідні процеси [5]. Stock & Seliger (2016) припустили, що Індустрія 4.0 має великий потенціал у створенні сталої промислової вартості на основі згаданої концепції TBL [16]. Окрім цього, відомі та сталі бізнес-моделі SBM (англ. *Shinwoo Banking Machines*) охоплюють цю концепцію та враховують багато особливостей, а також довкілля та суспільство загалом [6]. Вони мають важливе значення для управління та впровадження інноваційних бізнес-процесів для сталого розвитку шляхом прийняття стратегій циркулярної економіки (CE), таких як звуження, уповільнення та закриття ресурсного циклу [9], що робить їх ключовими рушійними силами досягнення конкурентної переваги та сталого розвитку назагал [3].

Отже, щоб отримати вигоду від синергії TBL, CE та SBM, сталий розвиток потрібно розглядати як політично керований цілісний підхід, зосереджений на використанні Індустрії 4.0 для досягнення сталих цінностей за рахунок ефективного використання ресурсів і спільної оптимізації ділової та соціальної цінностей, що приносить взаємну користь довкіллю, економіці та суспільству [11].

Матеріали та методи дослідження. Теоретичною основою послуговували наукові публікації щодо методологічних підходів Індустрії 4.0, її технологій та їх поєднання, особливо ті, що стосуються практик застосування на підприємствах лісового сектора економіки для вирішення конкретних прикладних завдань. В роботі використані такі методи дослідження: пошуковий за наявною літературою (статті доступні на *ScienceDirect*, матеріали конференцій, наукові звіти, рішення міжнародних організацій) з критичним оглядом зібраного матеріалу, теоретичне моделювання, конкретизація, аналіз документації та результатів діяльності дослідників з проблеми проведеного дослідження у різних країнах.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

"Індустрія 4.0" передбачає зв'язок між суб'єктами та об'єктами в режимі реального часу, який уможливує цифровізацію та автоматизацію всього середовища ланцюга поставок. Індустрія 4.0 тісно пов'язана з низкою нових технологій, таких як інтернет речей, кіберфізичні системи, доповнена реальність, аналітика великих даних, штучний інтелект, хмарні обчислення, кібербезпека, блокчейн, автономні роботи. Україна є не тільки споживачем технологій четвертої промислової революції, а й виступає активним їх розробником. В Україні найбільший вплив Індустрія 4.0 мала на агропродовольчий сектор. Хоча, зазвичай, його й вважають низькопродуктивним, а технології характеризують як застарілі, все ж агропродовольчий сектор України все активніше використовує новітні технології: масово запроваджують роботизовані процеси, квадрокоптери, датчики руху та сенсорні технології не тільки великі агрохолдинги, а й малий бізнес [14].

Лісова галузь також традиційно розглядалася як низько-технологічна, з невисокою доданою вартістю.



Рисунок. Конфігурація ланцюга постачання лісопродукції / Wood-based products supply chain configuration

Внесок технологій Індустрії 4.0 у лісовий сектор зосереджений на широкому спектрі видів діяльності: від ведення лісового господарства, заготівлі та транспортування деревини до реалізації продукції. Останній у переліку процес, який охоплює продаж, дистрибуцію та обслуговування, стосується також діяльності з обслуговування кінцевої продукції упродовж усього її життєвого циклу. Технології Індустрії 4.0 застосовують для збирання та аналізу великої кількості даних, які стосуються ланцюга постачання деревини, маючи на меті інформаційну підтримку процесів прийняття рішень. До питань, вирішення яких, виходячи з міжнародного досвіду, уже сьогодні передбачають застосування технологій Індустрії 4.0, варто віднести:

- прогнозування та виявлення лісових пожеж, розроблення динамічних моделей їх розповсюдження.
- виявлення комах-шкідників (використання датчиків для запису шумів всередині дерева, а за допомогою хмарних обчислень та технологій інтернету речей.
- зберігання та передавання їх для віддаленого аналізу) та хвороб (використання алгоритму штучного інтелекту, який дешифрує аерофотознімки, щоб можна було нанести на карту ураження грибовими патогенами), які можуть завдати пошкодження деревам.

Вона тривалий період часу значною мірою залежала від виробничих операцій із використанням бензопил, обладнання для заготівлі та транспортування деревини з лісових ділянок на переробні цехи для перероблення і реалізації на внутрішніх та міжнародних ринках [7]. Незважаючи на те, що цей традиційний підхід до робочих місць в лісі трансформується через запровадження нових технологій, підходів до управління, бізнес-моделей і передових систем підтримки прийняття рішень, все ж загалом трансформаційні процеси є повільними [8]. Поряд з агропродовольчим лісовий сектор є одним із тих, де ці технології мають значний потенціал. Сьогодні високий рівень зайнятості та доходів, що генеруються лісовим сектором, зумовлений не тільки різноманітною готовою продукцією, яку можна отримати з лісу (будівельні матеріали, меблі, папір та целюлоза, біопаливо тощо), але й численними видами діяльності та процесами, які здійснюються в цій галузі. Огляд цих видів діяльності (від лісу до готової продукції) представлений на рисунку, розробленого на підставі таких джерел, як [7, 12, 18].

- виявлення незаконних рубок (алгоритми штучного інтелекту можуть опрацювати величезні обсяги даних, що надходять від акустичних звуків у лісі або супутникових зображень).
- оцінювання фізичних та біофізичних властивостей лісів, їхнього ресурсного потенціалу.
- оптимізація процесів заготівлі деревини (рекомендація певних способів заготівлі для певних умов) на основі аналізу часу, витрат і продуктивності заготівельних операцій).
- контроль та попередження нелегальної торгівлі деревиною (відстеження продукції на основі використання потенціалу технологій блокчейн для зберігання даних стосовно безпечних і незмінних транзакцій).
- оптимізація процесів лісопиляння та виробництва (підвищення ефективності, безпеки, зниження витрат і підвищення якості робіт, для задоволення вдосконалення планування виробництва).
- покращення обслуговування клієнтів через удосконалення процесу продажу (клієнти також можуть віртуально дослідити стільники та мебелі рішення для своїх кімнат або будинків до прийняття рішення щодо придбання товарів).

Отже, кожна компанія (чи її філії) будуть пов'язаним та матимуть повне бачення потреб і статусу інших. Сигнали попиту та пропозиції, що генеруються в будь-який час, миттєво поширюються по мережі. Інформація про стан інвентаризації лісів, лісові операції, розташування

транспорту і будь-які збої, зафіксовані цифровими технологіями, буде видимою по всій системі в режимі реального часу, що дасть змогу усім організаціям приймати відповідні рішення. Покращена прозорість і точність інформації дасть змогу системі постачання працювати справді точно і вчасно, що істотно підвищить ефективність ланцюга постачання та скоротить витрати. Хмарна технологія та платформа зрештою підтримуватимуть централізоване спільне планування, прогнозування та поповнення запасів CPFR (англ. *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*), яке здійснюватиметься на основі єдиного набору інформації з усього ланцюга постачання. Завдяки спільному плануванню попит можна ефективно задовольнити з найближчих місць постачання лісу, а транспортування деревини може знайти оптимальні маршрути серед усіх можливих спільних маршрутів [8].

Деякі технології Індустрії 4.0, такі як штучний інтелект і хмарні обчислення, широко застосовують для задоволення потреб лісового сектору уже сьогодні. Інші технології, такі як блокчейн, доповнена реальність і автономні роботи менш вивчені. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на те, щоб технології Індустрії 4.0 покращили екологічні показники виробництва (впливи на довкілля та зміни клімату), зокрема такі, як екологічний потібно, вуглецевий потібно чи потібно біорізноманіття продукції чи підприємства.

Обговорення результатів дослідження. У дослідженнях Індустрії 4.0 є низка прогалин, такі як: брак емпіричних досліджень з використанням кількісних підходів і досліджень, орієнтованих на побудову теорії; зосередженість на окремих особливостях сталості, акцент на тому, що технології дають різноманітні екологічні та соціальні переваги (наприклад, економію ресурсів або покращення здоров'я та безпеки), але недостатньо є увага до можливих негативних наслідків. Обмеженими є дослідження щодо організаційної готовності, управління сталим розвитком та інших чинників, що значно сповільнюють зв'язок між Індустрією 4.0 і сталістю [2].

Уже сьогодні Індустрія 4.0 активно використовується для збирання, обміну та аналізу даних вздовж ланцюга постачання деревини за допомогою таких технологій, як інтернет речей, хмарні обчислення та штучний інтелект [7, 5, 6]. Інші технології, такі як блокчейн, доповнена реальність та автономні роботи, є менш дослідженими. Технології блокчейн можуть знайти значно ширше застосування для оптимізації процесу транспортування деревини. Технології візуалізації можуть бути корисними для навчання працівників (наприклад операторів харвестерів чи дронів у віртуальному лісовому середовищі та виробничих операцій у деревообробній та меблевій промисловості). Але щоб лісовий сектор, просуваючись до Індустрії 4.0, став повною мірою пов'язаним та інтегрованим, потрібен цілісний погляд на весь ланцюг поставок, як на систему *Forestry 4.0*. Тоді визначення *Forestry 4.0* розширюється до нової парадигми лісового сектору, побудованої на основі повної цифровізації, автоматизації та точності даних, пов'язаних з інтелектуальним управлінням лісами, заготівлею, транспортною логістикою, виробництвом та розповсюдженням продукції на ринки збуту [8]. Потрібно розробити та впровадити нові бізнес-моделі [3, 9], бізнес-аналітику в реальному часі, вдосконалені DSS (англ. *Digital Sa-*

tellite Service) та штучному інтелекті [15]. Необхідно налагодити інформаційно-комунікаційну співпрацю учасників ланцюга постачання лісопродукції, щоб вона стала тісно пов'язаною, інтегрованою та високоефективною в рамках цифрової екосистеми. Нові технології необхідно розгортати на всіх етапах скоординованим і стандартизованим способом [8]. Іншими словами, наскрізна цифровізація всіх фізичних активів ланцюга поставок лісопродукції потрібна задля того, щоб досягти цифрового зв'язку та операційної інтегрованості у цифрову екосистему за участі постачальників, клієнтів і партнерів. Кінцевою метою модернізації ланцюга постачання лісу є підвищення конкурентоспроможності продукції лісового сектору за рахунок підвищення ефективності та зниження операційних витрат. Питання планування стратегії впровадження Індустрії 4.0, що супроводжується інноваційною політикою в поширеному соціальному та інституційному середовищі, що містить п'ятикратний результат (соціальний, економічний, екологічний, технологічний та організаційний) і п'ятикратну спіраль (промисловість, уряд, університет, довкілля та суспільство) [11], потребують подальшого розгляду з урахуванням особливостей та викликів для сталого розвитку лісового сектору економіки.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено концептуальне обґрунтування процесу інтегрування концепції Індустрії 4.0 в систему управління сталим розвитком лісового сектору економіки, удосконалено пріоритетні напрями застосування технологій Індустрії 4.0 у лісовому секторі в розрізі етапів ланцюга постачання лісопродукції.

Практична значущість результатів дослідження – впровадження Індустрії 4.0 у лісовому секторі все ще є обмеженим і практичні результати є недостатніми через зосередженість винятково на цифрових технологіях. Очікувані вигоди від системної трансформації (а не тільки фрагментарного впровадження технологій) будуть значними в економічному (прибутки внаслідок ефективнішого використання ресурсів), екологічному (зменшення впливів на лісове довкілля унаслідок кращої можливості їх ідентифікації) та соціальному (врахування інтересів стейкхолдерів) плані. Результати дослідження можна використати для удосконалення чинних стратегій та планів дій, спрямованих на досягнення цілей сталого розвитку у лісовому секторі, діджиталізації процесів управління галуззю та формування сучасної інформаційної системи прийняття рішень. Це сприятиме запровадженню системи менеджменту сталого лісового господарства відповідно до міжнародних вимог.

Висновки / Conclusions

Системна трансформація лісового сектору економіки з урахуванням технологій Індустрії 4.0 є неминучою. Оскільки в усьому світі ці технології розвиваються та впроваджуються різними темпами, то ті країни і сектори які швидше і системніше застосовують їх, отримують більші переваги. Виконане дослідження дало змогу досягти очікуваної мети, а саме ідентифікувати перелік новітніх технологій Індустрії 4.0 у межах лісового сектору економіки в контексті сприяння його сталому розвитку та процесів управління і виробництва, які можуть

отримати найбільшу користь від впровадження цих технологій. Для цього зокрема:

1. Проаналізовано та систематизовано актуальні публікації, які висвітлюють зарубіжний досвід інтегрування новітніх інформаційних технологій у процеси прийняття рішень у лісовому секторі економіки. Це дало змогу зробити висновок, що значні обсяги даних, згенеровані в процесі охоплення ланцюга постачання деревини, можна використати для покращення процесів управління та виробництва, отримання конкурентної переваги та досягнення сталого розвитку.
2. Досліджено концепцію Індустрії 4.0 у контексті актуальних викликів і завдань, які постали перед лісовим сектором. З'ясовано, що перехід до Індустрії 4.0 у лісовому секторі, або ж *Forestry 4.0* як її називають, розглядаючи лісовий сектор, має передбачати не тільки вирішення питань оцифрування та автоматизації процесів управління та виробництва, а значно ширше коло питань. Ці питання не може охопити повною мірою окрема компанія, або якийсь окремий учасник ланцюжка поставок.
3. Розроблено концептуальне бачення системи *Forestry 4.0* як концепції індустрії 4.0 адаптованої до особливостей лісового сектора у контексті досягнення сталості його розвитку. Встановлено, що для формування такої системи необхідно створити високопродуктивну інформаційну та комунікаційну мережеву інфраструктуру, таку як бездротові мережі, платформи великих даних і систему хмарних обчислень. Мобільні пристрої, інтернет речей, інші цифрові сенсорні пристрої, об'єкти, машини та транспортні засоби, а також технології визначення місцезнаходження повинні широко використовуватися кожним суб'єктом господарювання на всіх етапах ланцюга лісопродукції.

References

1. Alonso, V., Soloviy, I., Chelepis, T., Lavnyy, V., Kehayova, E., Lippe, R., Wippel, B., & Schweinle, J. (2023, January). A step forward to enhance the wood processing industry: identifying its challenges. Conference: IUFRO 4.05.00 & 9.05.03 International Conference. <https://doi.org/10.20315/SilvaSlovenica.0022.06>
2. Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., & Sartor, M. (2021). Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 312, 127733, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>
3. Bocken, N. M., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014) A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). Decree of December 29, 2021, No. 1777 On the approval of the State Forest Management Strategy of Ukraine until 2035 (with changes and additions introduced by the order of the CMU dated September 22, 2023 r., N 840-r). [In Ukrainian]
5. Chang, D., & Chen, C. H., (2017). Digital design and manufacturing of wood head golf club in a cyber physical environment. *Industrial Management & Data Systems* 117(4), 648–671. <https://doi.org/10.1108/IMDS-07-2016-0280>
6. Culot, G., Nassimbeni, G., Orzes, G., & Sartor, M. (2020). Behind the definition of industry 4.0: analysis and open questions. *International Journal of Production Economics*, 107617. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107617>
7. DAmours, S., Rönqvist, M., & Weintraub, A. (2008). Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 46(4), 265–281. <https://doi.org/10.3138/infor.46.4.265>
8. Feng, Y., & Audy, J.-F. (2020). Forestry 4.0: a framework for the forest supply chain toward Industry 4.0. *Gestão & Produção*, 27(4), e5677. <https://doi.org/10.1590/0104-530X5677-20>
9. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
10. Guirado, E., Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Puertas-Ruiz, S., Herrera, F., & Tabik, S. (2020). Tree cover estimation in global drylands from space using deep learning. *Remote Sensing*, 12(3), 343. <https://doi.org/10.3390/rs12030343>
11. Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 297, 126655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
12. Molinaro, M., & Orzes, G. (2022). From forest to finished products: The contribution of Industry 4.0 technologies to the wood sector. *Computers in Industry*, Vol. 138, 103637. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103637>
13. Murmura, F., & Bravi, L. (2018). Additive manufacturing in the wood-furniture sector. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(2), 350–371. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2017-0175>
14. Omelchenko, A. I., & Bala, V. S. (2023). Development directions of the Ukrainian Industry 4.0 strategy. Business, innovation, management: problems and prospects. Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference, Kyiv Polytechnic Institute, 55–56. URL: <https://www.confmanagement.kpi.ua/proc/issue/view/16699>. [In Ukrainian]
15. Scholz, J., De Meyer, A., Marques, A. S., Pinho, T. M., Boaventura-Cunha, J., Van Orshoven, J., Rosset, C., Künzi, J., Kaarle, J., & Nummala, K. (2018). Digital technologies for forest supply chain optimization: existing solutions and future trends. *Environmental Management*, 62(6), 1108–1133. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1095-5>
16. Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
17. Teischinger, A. (2017). From forest to wood production – a selection of challenges and opportunities for innovative hardwood utilization. In: Natural Resources Institute Finland (Luke), Helsinki 2017 (ed.), 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP 2017, 20–21. URL: https://www.researchgate.net/publication/320077300_From_Forest_to_Wood_Production_a_selection_of_challenges_and_opportunities_for_innovative_hardwood_utilization
18. Zhang, S., Gao, D., Lin, H., & Sun, Q. (2019). Wildfire detection using sound spectrum analysis based on the internet of things. *Sensors*, 19(23), 5093. <https://doi.org/10.3390/s19235093>
19. Zhang, X., He, L., Karkee, M., Whiting, M. D., & Zhang, Q. (2020). Field evaluation of targeted shake-and-catch harvesting technologies for fresh market apple. *Transactions of the ASABE*, 63(6), 1759–1771. <https://doi.org/10.13031/trans.13779>

I. P. Soloviy, I. M. Korol

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

THE CONTRIBUTION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE FOREST SECTOR

To ensure the sustainable development of the forest sector, it is necessary to synthesize the existing knowledge on the application of Industry 4.0. Previous studies focused on some technologies and processes of the forest sector in the context of Industry 4.0 application. This study aims to identify the processes within the framework of sustainable development concept for the forest sector eco-

nomy that can benefit most from the implementation of Industry 4.0, how exactly and with the help of which technologies. The existing problems of forestry, in particular, the backwardness of the information base and lack of transparency, are emphasized in the paper. The role of Industry 4.0 technologies in solving these issues is defined. This article is focused on the study of Industry 4.0 technologies impact on forest sector development and the identification of optimal strategies for their implementation. The theoretical foundations of Industry 4.0 and its key components are presented, in particular, such components as Internet of Things, artificial intelligence, cloud computing, and blockchain. Particular attention is paid to the analysis of challenges and obstacles to the implementation of Industry 4.0 in the forest sector. The recommendations are developed to mitigate them. The issues of training personnel to work with these technologies and the formation of sustainable development strategies are considered. Moreover, the article highlights the identification of specific production processes that can maximize the benefits of Industry 4.0, namely, in terms of optimizing the supply chain and increasing its sustainability. A major emphasis is placed on identifying the latest Industry 4.0 technologies in the forestry sector and their certain contribution to the sustainable development of the industry. The technologies for governance and production digitalization considered as a tool to improve forest management quality. The study makes a contribution for extending knowledge for both scientists and practitioners interested in the application of new technologies in various processes of the forest sector.

Keywords: sustainable forest management; development strategy; digitalization; information technologies.