

УДК 021:004]:025

DOI 10.32461/2409-9805.2.2026.362112

Цитування:

Антоненко Д. С. Технології інтернету речей у SMART-бібліотеці: навігація та автоматизація фондів. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2026. № 2. С. 116–126.

Антоненко Дмитро Сергійович,
здобувач Київського національного
університету культури і мистецтв
<https://orcid.org/0009-0009-9157-802X>
indaheartbeat@gmail.com

Antonenko D. (2026). Internet of Things Technologies in Smart Library: Navigation and Collection Automation. *Library Science. Record Studies. Informology*, 2, 116–126 [in Ukrainian].

ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У SMART-БІБЛІОТЕЦІ: НАВІГАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ФОНДІВ

Мета статті – проаналізувати та систематизувати основні напрями застосування технологій Інтернету речей (IoT) у SMART-бібліотеці, зосередившись на автоматизації управління бібліотечними фондами (RFID, «розумні полиці», самообслуговування) та внутрішній навігації користувачів (BLE-маяки, мобільні застосунки, інтерактивні кіоски), а також оцінити перспективи впровадження цих рішень в Україні. **Методологія дослідження** ґрунтується на комплексному застосуванні загальнонаукових і спеціальних методів, зокрема аналізу та синтезу, порівняльно-аналітичного методу, методу кейс-стаді, а також системного підходу. **Наукова новизна** полягає в тому, що вперше в українському бібліотекознавстві здійснено системний аналіз двох ключових напрямів застосування IoT у SMART-бібліотеці – автоматизації фондів та внутрішньої навігації – як взаємопов'язаних компонентів єдиного інтелектуального простору. **Висновки.** IoT-технологія – підґрунтя трансформації традиційних бібліотек у SMART-бібліотеки, забезпечуючи автоматизацію фондів, інтелектуальну навігацію та підвищення якості обслуговування користувачів. Системи внутрішнього позиціонування на основі BLE-маяків, Wi-Fi та UWB, інтегровані з мобільними застосунками та інтерактивними кіосками, дозволяють скоротити час пошуку документів до 30% та створити інклюзивне середовище для людей із порушеннями зору. RFID-технології у поєднанні з «розумними полицями», кіосками самообслуговування та автоматизованими пунктами приймання забезпечують скорочення часу видачі/повернення з 10–15 до 2–4 секунд на документ, зменшення трудовитрат на інвентаризацію до 70% та підвищення точності обліку фондів. Міжнародний досвід (Сінгапур, Фінляндія, США) свідчить про ефективність комплексного впровадження IoT, що дозволяє досягти рівня самообслуговування понад 90% та суттєво оптимізувати роботу персоналу. В Україні впровадження IoT у бібліотеках стримується високою вартістю обладнання, застарілою мережевою інфраструктурою, ризиками кібербезпеки, недостатньою цифровою компетентністю персоналу та відсутністю державних програм підтримки.

Ключові слова: SMART-бібліотека, Інтернет речей (IoT), RFID, внутрішня навігація, автоматизація фондів, «розумні полиці», самообслуговування, інклюзивність, цифрова трансформація бібліотек.

Antonenko Dmytro,
PhD Student, Kyiv National University of Culture and Arts

INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES IN SMART LIBRARY: NAVIGATION AND COLLECTION AUTOMATION

The purpose of the article is to analyse and systematise the main areas of application of the Internet of Things (IoT) technologies in a SMART library, focusing on the automation of library collection management (RFID, smart shelves, self-service) and indoor user navigation (BLE beacons, mobile applications, interactive kiosks), as well as to assess the prospects for implementing these solutions in

Ukraine. **The research methodology** is based on the comprehensive application of general scientific and special methods, including analysis and synthesis, comparative analysis, case study method, and a systemic approach. **Scientific novelty** of the study lies in the fact that for the first time in Ukrainian library science, a systematic analysis of two key areas of IoT application in a SMART library – collection automation and indoor navigation – as interrelated components of a single intellectual space has been carried out. **Conclusions.** IoT technology is the foundation for the transformation of traditional libraries into SMART libraries, ensuring collection automation, intelligent navigation, and improved quality of user services. Indoor positioning systems based on BLE beacons, Wi-Fi, and UWB, integrated with mobile applications and interactive kiosks, can reduce document search time by up to 30% and create an inclusive environment for people with visual impairments. RFID technologies combined with smart shelves, self-service kiosks, and automated book drops reduce check-in/check-out time from 10–15 seconds to 2–4 seconds per document, reduce inventory labour costs by up to 70%, and improve the accuracy of collection management. International experience (Singapore, Finland, USA) demonstrates the effectiveness of comprehensive IoT implementation, achieving a self-service rate of over 90% and significantly optimising staff work. In Ukraine, the implementation of IoT in libraries is constrained by high equipment costs, outdated network infrastructure, cybersecurity risks, insufficient digital competence of staff, and the lack of state support programmes.

Keywords: SMART library, Internet of Things (IoT), RFID, indoor navigation, collection automation, smart shelves, self-service, inclusivity, digital transformation of libraries.

Актуальність теми дослідження. В умовах сучасного інформаційного та цифрового простору бібліотеки дедалі більше відмовляються від своєї традиційної ролі статичних депозитаріїв документів, еволюціонуючи в динамічні, інтелектуальні комунікаційні центри. Одним із ключових технологічних інструментів, що сприяє цьому перетворенню, є Інтернет речей (IoT), який забезпечує інтеракцію матеріальних об'єктів через цифрові мережі без прямого людського втручання. У провідних світових бібліотечних установах (зокрема, Сінгапурі, Фінляндії, США) впровадження IoT-рішень вже довело свою ефективність: засоби радіочастотної ідентифікації (RFID) дозволяють автоматизувати облік фондів, технологія Bluetooth Low Energy (BLE) сприяє оптимізації орієнтування відвідувачів у масштабних бібліотечних просторах, а інтегровані сенсорні комплекси значно покращують енергоефективність приміщень. Натомість в Україні впровадження IoT у бібліотечну справу залишається фрагментарним і здебільшого теоретичним, що зумовлює регрес у якості надання послуг, субоптимальне використання наявних ресурсів й послаблення конкурентних позицій бібліотечних установ відносно комерційних інформаційних структур.

Попри підвищений інтерес до концепції SMART-бібліотеки в українській бібліотечній науці, комплексне вивчення потенціалу саме IoT-технологій не отримало належного розвитку. Переважна більшість наукових праць редукується до загальних оглядів або опису одиничних рішень (переважно радіочастотної ідентифікації), без глибокого аналізу системного впливу IoT на такі визначальні аспекти, як автоматизація біблі-

отечних колекцій, просторова орієнтація користувачів та оптимізація енергоспоживання. Бракує також обґрунтованих методологічних настанов щодо критеріїв вибору технологічних рішень, оцінки економічної доцільності та експлуатаційної ефективності, а також механізмів адаптації міжнародного досвіду до специфічних умов України (зокрема, обмежені бюджетні асигнування, застаріла матеріально-технічна база, правові суперечності у сфері захисту персональних даних). Отже, має місце диспаритет між об'єктивною необхідністю модернізації бібліотечних установ за допомогою IoT-рішень та браком цілісного науково-методичного забезпечення для такої модернізації. Вирішення цієї проблеми є необхідною умовою для розробки реальних дорожніх карт SMART-трансформації бібліотек в Україні.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблематика впровадження технологій IoT у бібліотечну сферу знаходить своє відображення, як у зарубіжних, так і в окремих українських наукових розвідках. Значний масив праць присвячено теоретичним основам IoT як загально технологічного феномену, зокрема аналізу його архітектури (рівні сприйняття, мережі, обробки даних та застосунків), мережевих протоколів (MQTT, LoRaWAN) та хмарних платформ. У контексті бібліотечної діяльності важливими є комплексні розвідки, що систематизують досвід застосування IoT у бібліотеках. Зокрема, дослідники А. А. Адеводжо та О. П. Монджолалува на основі аналізу кейсів та пілотних проєктів доводять ефективність RFID-систем для самообслуговування та інвентаризації в реальному часі, а також сенсорів для енергоефективного клімат-

контролю [10]. Систематичний та критичний огляд літератури Х. Шахзадта з колегами визначає ключові чинники впровадження IoT в університетських бібліотеках, акцентуючи на викликах інтеграції з застарілими системами та високих початкових витратах [21]. М. С. Гіріш Ратод у своєму дослідженні розглядає процес перетворення традиційних бібліотек на розумні навчальні простори з інтеграцією IoT, хмарних обчислень та ШІ [19]. В українському дискурсі хотілося б відзначити публікацію Ю. Куліш про створення SMART-бібліотек за допомогою IoT як перспективний напрям розвитку інформаційно-освітнього простору університету [6], а також власні напрацювання, які стосуються теоретико-концептуальних і категоріальних аспектів осмислення функціонування SMART-бібліотек [1; 2].

Поряд із теоретичними роботами, можна виокремити пласт досліджень, безпосередньо присвячених прикладним аспектам IoT у визначених напрямках. У сфері автоматизації фондів переважають праці, що емпірично підтверджують ефективність RFID-технологій: від інтелектуального управління книговидачею та інвентаризацією до розробки мобільних роботизованих платформ для автономного сканування полиць [25]. Низка досліджень пропонує низьковартісні IoT-архітектури, зокрема з використанням програмно-конфігурованих мереж (SDN), що є особливо актуальним для бібліотек з обмеженим фінансуванням [27]. Проблематика навігації у бібліотечному просторі досліджується переважно через застосування BLE-маяків та Wi-Fi RSSI-технологій; Т. Нопіані Дамаянті, Д. Н. Рамадан та І. Мутіа Утамі запропонували Android-застосунок для побудови маршрутів до книжкових полиць на основі триангуляції сигналу [12]. В Україні практичні аспекти застосування RFID у бібліотеках розглядаються переважно в контексті економії коштів, захисту фондів та підвищення якості обслуговування, однак комплексних студій, які б інтегрували напрями автоматизації та навігації в єдину концепцію IoT для SMART-бібліотеки, наразі бракує.

Мета статті – проаналізувати та систематизувати основні напрями апробації технологій Інтернету речей (IoT) у SMART-бібліотеці, зосередившись на двох ключових аспектах, – по-перше, автоматизація управління бібліотечними фондами (RFID, «розумні полиці», самообслуговування) та, по-друге, внутрішня навігація користувачів (BLE-маяки, мобільні застосунки, інтерактивні кіоски), – а також оцінити перспективи їхнього впровадження в Україні.

Виклад основного матеріалу. На відміну від відомих і добре розроблених систем глобального позиціонування (GPS), навігація у закритих

приміщеннях бібліотек стикається з низкою технологічних викликів. Будівлі з їхніми стінами та перекриттями блокують супутникові сигнали, роблячи GPS-рішення неефективними. Вирішення цієї проблеми пропонують системи внутрішнього позиціонування (Indoor Positioning Systems, IPS), які задіють альтернативні бездротові технології для триангуляції місцезнаходження користувача [13].

Найбільш поширеною технологією для IPS є Bluetooth Low Energy (BLE). Спеціальні пристрої – BLE-маяки (beacons) – розміщуються по периметру будівлі та періодично надсилають сигнали, які вловлюються смартфоном відвідувача. Система аналізує рівень отриманого сигналу (Received Signal Strength Indication, RSSI) від кількох маяків, що дозволяє визначити місце розташування користувача з точністю до 1–3 метрів [17]. Перевагами BLE є низьке енергоспоживання (маяки можуть працювати від батарейки до 5 років) та простота розгортання. Wi-Fi використовується переважно як допоміжний канал у гібридних системах (метод «відбитків» сигналу), або для забезпечення базової мережевої інфраструктури [15]. Технологія Ultra-Wideband (UWB) забезпечує вищу точність позиціонування завдяки вимірюванню часу проходження сигналу, проте її впровадження є дорожчим й вимагає спеціалізованого апаратного забезпечення. Універсальним рішенням для SMART-бібліотек є комбінування цих технологій у гібридних системах, де BLE забезпечує базове позиціонування, а Wi-Fi корегує його в зонах перешкод.

Отримані IPS-системами координати стають основою для навігаційних застосунків, які перетворюють складний простір бібліотеки на зрозумілу цифрову карту. Як зазначають дослідники, інтеграція маяків та інтерактивних карт у мобільному додатку зменшує час, необхідний користувачам для навігації в незнайомій будівлі, приблизно на 30% [13].

Сучасні рішення пропонують низку ключових функцій: пошук необхідного видання або сервісу (наприклад, зона тиші чи кімната для групових занять) з подальшою побудовою оптимального маршруту; покрокову навігацію в режимі реального часу (turn-by-turn) з візуалізацією на мапі, яка масштабується та обертається з рухом користувача; інтеграцію з бібліотечною інформаційною системою для відображення актуальної наявності книг на полицях; та голосовий супровід, який дозволяє користувачеві не відволікатися на екран смартфона. Розробка цих застосунків триває на крос-платформених фреймворках (наприклад, Flutter), що забезпечує їхню роботу як на iOS, так і на Android. Принцип роботи зазвичай базується на використанні SDK

(Software Development Kit) навігаційних платформ, які обробляють сигнали маяків і будують маршрути на основі алгоритмів пошуку шляху [13].

Інтерактивні кіоски слугують стаціонарними навігаційними хабами, які доповнюють мобільні застосунки та забезпечують доступ до навігації для відвідувачів без смартфонів. Як правило, це сенсорні панелі з програмним забезпеченням, яке інтегроване з IPS-системою будівлі. Основна функція кіоску – надання інтерактивної мапи приміщення з можливістю пошуку точок інтересу (POI), таких як полиці з певною літературою, служби реєстрації чи санітарні кімнати. Ключовою особливістю є оновлення інформації в реальному часі. Наприклад, кіоск може показувати поточну завантаженість читальних залів або наявність вільних місць для роботи, використовуючи дані з сенсорів присутності в приміщенні. Інтерактивна система може надавати не лише маршрут, але й друкувати його коротку версію або надсилати посилання на мобільний пристрій користувача. Крім того, сучасні кіоски інтегруються з бібліотечними каталогами, дозволяючи відвідувачеві знайти книгу та одразу побачити на мапі її точне розташування та статус (в наявності, на руках, в ремонті). Такий підхід значно підвищує самостійність користувачів та знижує навантаження на персонал, звільняючи бібліотекарів для виконання більш кваліфікованих завдань [11].

Одним із найважливіших напрямів застосування навігаційних технологій у бібліотеках є створення інклюзивного середовища для людей з порушеннями зору. Традиційні візуальні покажчики та мапи є для них неефективними, що створює бар'єри для самостійного пересування. Технології IoT пропонують тут комплексне рішення, яке поєднує апаратне та програмне забезпечення. На апаратному рівні вздовж маршрутів розміщуються аудіо-маяки, які автоматично активуються при наближенні людини та передають голосову інформацію про поточне місцезнаходження або напрямок руху. Також використовуються тактильні сенсори, зокрема, спеціальні покриття підлоги або напрямні смуги, які допомагають орієнтуватися за допомогою білої тростини. На програмному рівні розробляються спеціалізовані мобільні застосунки, які використовують BLE-маяки та технології IPS для забезпечення голосової навігації. Користувач отримує покрокові голосові підказки, а система може подавати попереджувальні сигнали при наближенні до сходів чи інших небезпечних зон. Сучасні розвідки пропонують використання алгоритмів триангуляції на основі сигналів BLE для визна-

чення місця розташування незрячої людини з точністю, достатньою для безпечної навігації усередині приміщення [17].

Практичне застосування описаних технологій демонструють бібліотеки по всьому світу. У бібліотеці Університету Невади (University of Nevada, Reno) було впроваджено систему «Wolf Pack Map» – мобільний застосунок з функцією внутрішньої навігації, яка допомагає студентам та відвідувачам орієнтуватися у величезному кампусі. Система використовує BLE-маяки для навігації всередині будівель, зокрема для пошуку необхідних книг у багатоярусних книгосховищах, що економить час користувачів [20]. Це є яскравим прикладом використання технологій точкового позиціонування в освітньому середовищі.

Ще більш інноваційним є досвід центральної бібліотеки Гельсінкі Oodi (Фінляндія), яка щодня приймає близько 10 000 відвідувачів. Крім використання BLE-маяків для навігації, вона впровадила унікальне рішення – соціального робота-гіда. Він створений на базі промислового робота MiR200, який зазвичай використовується для транспортування книг. Робот безпосередньо під'їжджає до відвідувача, отримує запит через сенсорний екран, зв'язується з бібліотечною базою даних у реальному часі та веде людину до потрібної полиці. Такий підхід вивільняє час бібліотекарів для глибокої консультаційної роботи і робить процес пошуку літератури максимально зрозумілим. Для людей з порушеннями зору в бібліотеці Oodi передбачено спеціальні тактильні напрямні смуги на підлозі та покажчики шрифтом Брайля, що робить бібліотеку доступною для всіх категорій громадян [11]. Цей кейс демонструє, як комплексне застосування IoT-технологій перетворює бібліотеку на справді «розумний» простір, де технології працюють непомітно та ефективно.

Радіочастотна ідентифікація (Radio Frequency Identification, RFID) є фундаментальною технологією, що забезпечує автоматизацію управління бібліотечними фондами в концепції SMART-бібліотеки. На відміну від традиційних штрих-кодів, які вимагають прямої видимості та поштучного сканування, RFID використовує радіохвилі для безконтактного зчитування інформації з міток, що дозволяє одночасно сканувати десятки об'єктів за лічені секунди [8]. Це докорінно змінює підхід до обліку та управління книжковими фондами, оскільки RFID забезпечує високу швидкість, точність, довговічність і можливість повної автоматизації процесів. Система RFID складається з трьох основних компонентів: міток (тегів), зчитувачів з антенами та програм-

ного забезпечення, яке інтегрується з бібліотечною автоматизованою інформаційною системою (АБІС). Ключовим елементом є RFID-мітка – мініатюрний пристрій, де є мікросхема для зберігання даних (унікальний ідентифікаційний номер, назва книги, автор тощо) та антени для прийому й передачі радіосигналу. Принцип роботи полягає в тому, що зчитувач генерує електромагнітне поле, яке активує мітку; остання, отримавши енергію, передає збережену інформацію назад на зчитувач. У бібліотечних системах, як правило, використовуються пасивні мітки, які не мають власного джерела живлення та активуються виключно енергією сигналу зчитувача. Це забезпечує їхню необмежену тривалість роботи (до 10–15 років), малі розміри та низьку вартість, хоча дальність зчитування обмежується кількома десятками сантиметрів. Активні мітки, натомість, оснащені власною батареєю, що дозволяє передавати сигнали на значно більші відстані (до 100 метрів) та використовувати вбудовані датчики (температури, вологості тощо). Однак через високу вартість та обмежений термін служби батареї (3–5 років) активні мітки в бібліотечній практиці застосовуються рідше, переважно для відстеження цінних або великогабаритних матеріалів [5].

«Розумна полиця» (smart shelf) є одним з найбільш інноваційних застосувань RFID-технології в бібліотечній сфері. На відміну від традиційних стаціонарних зчитувачів, які використовуються в пунктах видачі/приймання, smart shelf інтегрує RFID-антени безпосередньо в полицю, створюючи зону постійного моніторингу. Кожна книга, оснащена RFID-міткою, континуально «видима» для системи, що дозволяє автоматично відстежувати її наявність, точне місце розташування та статус. Це вирішує одну з ключових проблем традиційних бібліотек – розбіжність між даними каталогу та реальним місцезнаходженням документа, спричинену неправильним розставленням або несанкціонованим вилученням [24].

Сучасні smart shelf рішення, такі як smartShelf від компанії bibliotheca, пропонують доступні, компактні автоматизовані системи приймання повернень, які миттєво знімають книгу з обліку користувача, деактивують захист і роблять її доступною для наступного позичання одразу після повернення на полицю. Більш просунуті системи, як-от newave smartShelf, забезпечують моніторинг інвентарю в реальному часі без необхідності додаткового маркування окремих предметів, що значно знижує вартість впровадження. Smart shelf інтегрується безпосередньо з АБІС через стандартні API-інтерфейси, забезпечуючи синхронізацію даних про фонди в ре-

жимі реального часу [22]. Це дозволяє користувачам бачити актуальну інформацію про наявність книги в онлайн-каталозі, а бібліотекарям – миттєво виявляти переставлені чи відсутні документи, скорочуючи час на інвентаризацію.

Самообслуговування – чи не найпомітніший для кінцевого користувача прояв автоматизації на основі RFID. Кіоски самообслуговування (self-check kiosks) дозволяють відвідувачам самотійно здійснювати операції позичання, повернення та поновлення документів без участі бібліотекаря. Процес є максимально спрощеним: користувач ідентифікує себе за допомогою читацького квитка з RFID-міткою, розміщує стопку книг на зчитувальній панелі, і система автоматично реєструє всі документи за лічені секунди, після чого деактивує захисні мітки. Це не лише скорочує час обслуговування (з 10–15 секунд на один документ до 2–4 секунд), а й зменшує навантаження на персонал, звільняючи його для більш кваліфікованої консультативної та аналітичної роботи [14].

Автоматизовані пункти прийняття (automated book drops) є логічним продовженням цієї концепції. Встановлені при вході до бібліотеки або на зовнішніх стінах, вони дозволяють користувачам повертати книги в будь-який час, навіть коли бібліотека зачинена [9]. Інтегровані з системою автоматичного сортування (automated sorting systems), такі пункти не лише реєструють повернення, але й розподіляють документи за категоріями або відділами, оптимізуючи подальше розставлення. У найбільш розвинених реалізаціях (наприклад, в автоматизованих книгосховищах ASRS – Automated Storage and Retrieval Systems) роботизовані маніпулятори самотійно вилучають повернені документи з накопичувачів та розміщують їх на призначені місця зберігання, повністю виключаючи ручну працю на цьому етапі.

Традиційні системи електронного захисту товарів (EAS – Electronic Article Surveillance) використовуються в бібліотеках десятиліттями. Вони складаються з антенних воріт при вході/виході та спеціальних міток на документах; при спробі винести нелегалізований документ ворота генерують звуковий сигнал. Основною функцією EAS є виключно захист від крадіжок, тоді як RFID пропонує значно ширший спектр можливостей [23].

Сучасні бібліотечні системи все частіше інтегрують функції EAS безпосередньо в RFID-інфраструктуру. Одна й та сама RFID-мітка може використовуватися як для автоматизації процесів позичання та інвентаризації, так і для захисту від крадіжок. У цій моделі захисні ворота обладнуються RFID-зчитувачами, які перевіряють статус

кожної мітки при проходженні документа через контрольну зону. Якщо документ не був належним чином зареєстрований у системі (тобто RFID-мітка залишається в активному стані), ворота блокують прохід або генерують сигнал тривоги [9]. Ключовою перевагою такого підходу є унеможливлення обходу захисту шляхом фізичного блокування сигналу (як-от обгортанням книги фольгою), оскільки система перевіряє саме цифровий статус мітки, а не лише її наявність. Крім того, інтеграція RFID та EAS дозволяє створювати розподілені системи безпеки, де окремі зони бібліотеки (наприклад, читальний зал з рідкісними виданнями або зона відкритого доступу) мають різні рівні контролю, що автоматично регулюються залежно від статусу користувача та типу документів [26].

Одним з найбільш показових прикладів успішного впровадження RFID-технологій у бібліотечну справу є Національна бібліотечна рада Сінгапуру (NLB – National Library Board), яка однією з перших у світі впровадила повномасштабну RFID-систему у 2003 р. Нині NLB керує мережею з 27 публічних бібліотек та обслуговує понад 2,1 млн читачів. Система використовує високочастотні (HF, 13,56 МГц) RFID-мітки, сумісні зі стандартом ISO 15693, що забезпечує оптимальний баланс між дальністю зчитування (10–30 см) та захистом від перешкод [14]. Результати впровадження є вражаючими: час операцій позичання/повернення скоротився з 10–15 секунд на один документ до 2–4 секунд; частка використання самообслуговування перевищила 90%; повна інвентаризація фондів, яка раніше займала тижні, тепер виконується за один день; а потреби в ручній праці скоротилися на 40%. У 2022 р. NLB запустила пілотний проект «Grab-n-Go» – автоматизовані турнікети, які застосовують ультрависокочастотну (UHF) RFID-технологію для автоматичного позичання книг при виході читача з бібліотеки без необхідності окремого сканування на кіоску [18]. Цей проект є частиною стратегії LAB25 (Library and Archives Blueprint 2025), спрямованої на повну цифрову трансформацію бібліотечних послуг.

Хоча пряма інформація про повномасштабне впровадження RFID в бібліотеці Університету Оулу є обмеженою, дослідницька діяльність цього університету в галузі RFID має важливе значення для розвитку технології в цілому. Вчені Університету Оулу розробили набір інструментів з відкритим вихідним кодом для аудиту RFID-сигналів, що дозволяє проводити системний аналіз радіочастотних протоколів RFID-систем. Крім того, університет вивчав використання NFC-сумісних мобільних телефонів та RFID-

міток для управління локальними сервісами. Дослідження, проведені в Університеті Оулу, зокрема аналіз ефективності використання RFID у фінських бібліотеках, показали, що технологічний потенціал RFID використовується не повною мірою порівняно зі Швецією, де впровадження є значно більш просунутим [16]. Це свідчить про те, що навіть у технологічно розвинених країнах існує значний резерв для подальшої автоматизації бібліотечних процесів на основі RFID.

В Україні впровадження RFID-технологій у бібліотечну сферу перебуває на початковій стадії. Існують окремі приклади використання RFID для автоматизації обліку книжкових фондів та самообслуговування, переважно в бібліотеках вищих навчальних закладів, однак ці проекти носять пілотний або локальний характер [5]. Основними перешкодами для широкого впровадження є висока вартість обладнання (RFID-мітки, зчитувачі, програмне забезпечення), необхідність модернізації існуючої мережевої інфраструктури, а також відсутність державних програм підтримки SMART-трансформації бібліотек. Водночас український ринок RFID-рішень пропонує повний спектр обладнання та програмного забезпечення, зокрема системи самообслуговування, розумні полиці та захисні ворота, що інтегруються з популярними в Україні АБІС [5]. Перспективним напрямком для подальшого розвитку є створення пілотних SMART-бібліотек на базі провідних університетських та публічних бібліотек з подальшим тиражуванням успішного досвіду, а також розробка типових «дорожніх карт» впровадження RFID з урахуванням українських реалій.

Одним із головних бар'єрів є чималі витрати у процесі впровадження IoT-рішень. В умовах хронічного недофінансування бібліотечної галузі, що ускладнюється воєнним станом та економічною нестабільністю, більшість бібліотек не можуть дозволити собі масштабні інвестиції в сучасні технології. Придбання необхідного обладнання вимагає значних коштів: орієнтовна вартість одного RFID-терміналу самообслуговування починається від €3 000, а вартість однієї RFID-мітки для книги становить від €0,20 до €0,40. Для невеликої бібліотеки з фондом у 50 000 примірників стартові інвестиції в RFID-систему можуть сягати приблизно €15 000 – 20 000. До цього слід додати витрати на придбання BLE-маяків для навігації, спеціалізоване програмне забезпечення та його інтеграцію з існуючими автоматизованими бібліотечними інформаційними системами (АБІС). Хоча термін окупності таких інвестицій оцінюється в 2–3 роки завдяки економії робочого часу персоналу та зменшенню

втрат фонду, початковий капітал для більшості українських бібліотек залишається критично недоступним.

Також ефективне функціонування IoT-систем є неможливим без надійної та сучасної мережевої інфраструктури. Технології IoT вимагають постійного високошвидкісного з'єднання для передачі даних між сенсорами, пристроями, центральними серверами та хмарними платформами. Багато бібліотек в Україні, особливо у віддалених громадах або в будівлях зі складною архітектурою, досі використовують застарілі локальні мережі, що не здатні забезпечити необхідну пропускну здатність або стабільне покриття бездротового зв'язку (Wi-Fi). Впровадження системи внутрішнього позиціонування (IPS) на основі BLE-маяків вимагає стратегічного розміщення пристроїв і належного функціонування програмного забезпечення для тріангуляції сигналу, що також залежить від якості базової мережі. Отже, перед встановленням будь-якого IoT-рішення бібліотекам часто потрібно проводити дорогу модернізацію всієї внутрішньої мережевої інфраструктури, що для багатьох є непосильним завданням.

Впровадження IoT пристроїв, які збирають та обробляють дані про користувачів (від історії позичання до геолокації всередині бібліотеки), створює значні ризики для кібербезпеки та конфіденційності. Це вимагає суворого дотримання законодавства у сфері захисту персональних даних, зокрема Закону України «Про захист персональних даних» та, в контексті євроінтеграції, принципів Загального регламенту про захист даних (GDPR). Кібербезпека в публічних бібліотеках, які зазвичай мають обмежені бюджети та мандат на відкритий доступ, перетворилася на критично важливе, але не завжди досяжне завдання. Наукові дослідження свідчать, що чинне українське законодавство не завжди встигає адаптуватися до стрімкого розвитку технологій, що призводить до правових прогалин, які можуть бути використані для несанкціонованого доступу до інформації [3].

Успішна трансформація бібліотеки неможлива без готовності її персоналу до змін. Впровадження нових технологій нерідко зустрічає внутрішній опір, викликаний страхом перед невідомим, небажанням змінювати звичні робочі процеси або побоюванням скорочення робочих місць. Цифрова трансформація вимагає від бібліотекарів опанування абсолютно нових функцій та цифрових компетентностей. Як зазначають дослідники, в умовах цифрової трансформації з'являються нові «цифрові» професії, орієнтовані на підтримку цих процесів, менеджмент веб-контенту та веб-спільнот, що вимагає високого

рівня кваліфікації [4; 7]. На жаль, недостатній рівень цифрової грамотності значної частини бібліотечних працівників та відсутність системи безперервного професійного навчання стають суттєвою перешкодою. Це створює розрив між технологічними можливостями, закладеними в IoT-системах, і реальною здатністю персоналу цими можливостями ефективно користуватися.

Наразі в Україні бракує цілісної державної політики та спеціалізованих програм підтримки цифрової трансформації бібліотек. Попри наявність успішних прикладів та окремих ініціатив, наприклад, створення Хабів цифрової освіти за підтримки Програми розвитку ООН, системного підходу, що охоплював би фінансування технологічної модернізації, розвиток мережевої інфраструктури та підвищення кваліфікації кадрів у масштабах усієї країни, не сформовано. Недостатня державна підтримка згадується як одна з ключових причин, що стримують розвиток бібліотечної справи. Без залучення державних коштів та розробки загальнонаціональних стратегій, впровадження IoT так і залишиться долею окремих пілотних проєктів або бібліотек, що мають доступ до міжнародних грантів або спонсорської підтримки.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше в українському бібліотекознавстві здійснено системний аналіз двох ключових напрямів застосування IoT у SMART-бібліотеці – автоматизації фондів та внутрішньої навігації – як взаємопов'язаних компонентів єдиного інтелектуального простору.

Висновки. Таким чином, у результаті дослідження встановлено, що IoT-технології постають ключовим драйвером трансформації традиційних бібліотек у SMART-бібліотеки, забезпечуючи автоматизацію фондів, інтелектуальну навігацію та підвищення ефективності обслуговування користувачів. Системи внутрішнього позиціонування (IPS) на основі BLE-маяків, Wi-Fi та UWB дозволяють створювати інтерактивні навігаційні рішення (мобільні застосунки, кіоски), що зменшують час пошуку документів у середньому на 30% і покращують доступність бібліотечного простору, зокрема для осіб з порушеннями зору через інтеграцію аудіо-маяків і тактильних сенсорів. RFID-технології, як базовий компонент автоматизації фондів, у поєднанні з «розумними полицями» (smart shelves), кіосками самообслуговування та автоматизованими пунктами приймання забезпечують скорочення часу операцій видачі/повернення з 10–15 до 2–4 секунд на документ, зменшення витрат ручної праці на інвентаризацію до 70% та підвищення рівня точності обліку фондів. Інтеграція RFID з EAS-системами створює багаторівневий захист фондів

від несанкціонованого вилучення. Аналіз міжнародного досвіду (Національна бібліотечна рада Сінгапуру, бібліотека Університету Невади, бібліотека Oodi в Гельсінкі) підтверджує ефективність комплексного впровадження IoT-рішень, що дозволяє досягти рівня самообслуговування понад 90%, скоротити потреби в ручній праці на 40% та перетворити бібліотеку на інклюзивний, інтелектуальний простір.

В Україні впровадження IoT у бібліотечну сферу перебуває на початковій стадії; основними перешкодами є висока вартість обладнання (стартові інвестиції для бібліотеки з фондом 50 тис. примірників становлять €15 000–20 000), необхідність модернізації мережевої інфраструктури, ризики кібербезпеки та захисту персональних даних, недостатня цифрова компетентність персоналу, а також відсутність цілісної державної політики підтримки SMART-трансформації бібліотек.

Перспективні напрями подальших досліджень: розробка «дорожньої карти» впроваджен-

ня IoT-технологій для публічних та університетських бібліотек України з урахуванням обмеженого фінансування, стану матеріально-технічної бази та кадрового потенціалу; створення методики оцінки економічної ефективності впровадження RFID та навігаційних систем у бібліотеках різних типів, включаючи розрахунок реальних термінів окупності інвестицій; аналіз можливостей застосування технологій III в поєднанні з IoT для прогнозування попиту на документи, оптимізації розміщення фондів й персоналізації навігаційних маршрутів; розробка моделі інклюзивної SMART-бібліотеки з акцентом на адаптацію IoT-рішень для осіб з порушеннями зору, слуху та опорно-рухового апарату, а також для людей похилого віку; аналіз правових та кібербезпекових аспектів функціонування IoT у бібліотеках, зокрема розробка рекомендацій щодо захисту персональних даних користувачів відповідно до вимог GDPR та українського законодавства та ін.

Список використаних джерел

1. Антоненко Д. С. «Smart-бібліотека» як інноваційний бібліотекознавчий термін. *Вісник Харківської державної академії культури*. 2024. Вип. 66. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.31516/2410-5333.066.07>.
2. Антоненко Д. С. Smart-Бібліотека: технологічні підходи. *The process and dynamics of the scientific path* : Proceedings of the VII International Scientific and Theoretical Conference, Athens, November 22, 2024. Athens : International Center of Scientific Research, 2024. P. 398–401. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-22.11.2024>.
3. Биков О. М., Савченко В. В. Захист персональних даних у сучасному законодавстві. *Legal Bulletin*. 2024. № 14. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31732/2708-339X-2024-14-A9>.
4. Гуменчук А. Система цифрових компетентностей Бібліотекаря 4.0. *Вісник Книжкової палати*. 2020. № 2. С. 23–28. DOI: [https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.2\(283\).23-28](https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.2(283).23-28).
5. Застосування та переваги системи управління бібліотекою RFID. *RFIDSilicone*. 2026. 31 берез. URL: <https://www.rfidsilicone.com/uk/blog/applications/rfid-library-management-system-applications-and-benefits.html> (дата звернення: 10.02.2026).
6. Куліш Ю. О. Створення smart-бібліотек за допомогою Інтернету речей як перспективний напрям розвитку інформаційно-освітнього середовища університету. *Інформація та соціум* : зб. матеріалів VIII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Вінниця, 02 черв. 2023 р. Вінниця : Донецький нац. ун-т імені Василя Стуса, 2023. С. 111–113.
7. Матвієнко О., Цивін М. «ІТ-бібліотекарі»: пошук шляхів інноваційності, трудової мобільності чи зміна ціннісних орієнтирів професії? *Вісник Книжкової палати*. 2020. № 3. С. 25–30. DOI: [https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.3\(284\).25-30](https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.3(284).25-30).
8. Михайлов І. О., Партика С. О. Моделі та приклади використання RFID-технологій. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : тези доп. XII Міжнар. наук.-техн. конф., 27–28 квітня 2022 р. Баку; Харків : Петров В. В., 2022. Т. 1. С. 64.
9. Розумна бібліотечна система RFID – цифрове управління бібліотекою за допомогою RFID. *Технотрейд*. URL: <http://uarfid.kiev.ua/ua/statji/rozumna-bibliotechna-sistema-rfid-tsifrove-upravlinnya-bibliotekoju-za-dopomogoyu-rfid/> (дата звернення: 10.02.2026).
10. Adewojo A. A., Monjolaoluwa O. P. Smart library environments: IoT and automation for next-generation services. *Business Information Review*. 2025. Vol. 42(4). P. 232–237. DOI: <https://doi.org/10.1177/02663821251384884>.

11. Axelsson M. The Little Robot that Lived at the Library. *Futurice*. 2019. 23 July. URL: <https://www.futurice.com/blog/the-little-robot-that-lived-at-the-library> (дата звернення: 10.02.2026).
12. Damayanti T. N., Ramadan D. N., Utami I. M. MyLib: Smart library indoor navigation using bluetooth low energy with triangulation method. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2022. Vol. 68, No. 2. P. 293–298.
13. Ferreira J. C., Resende R., Martinho S. Beacons and BIM Models for Indoor Guidance and Location. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 12. 4374. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18124374>.
14. Global Transformation Through RFID Library Technology: Real Case Studies from Singapore and Rotterdam. *Custom RFID Tags*. URL: <https://custom-rfid-tags.com/rfid-library-tags-for-book/> (дата звернення: 10.02.2026).
15. Indoor Navigation System for Accessible Friendly Services and Facilities in the Library. *Mada Innovation Program*. URL: <https://mip.mada.org.qa/focused-area-use-cases/library/indoor-navigation-system-for-accessible-friendly-services-and-facilities-in-the-library/> (дата звернення: 10.02.2026).
16. Kainunkangas S. RFID-tekniikka ja sen hyödyntäminen kirjastoissa : ammattikorkeakoulun opinnäytetyö / Hämeen ammattikorkeakoulu. Valkeakoski, 2013. 37 p. URL: <https://www.theseus.fi/handle/10024/63885> (дата звернення: 10.02.2026).
17. Lara-Alvarez P., Jadán-Guerrero J., Guevara-Maldonado C. B., Sanchez-Gordon S., Calle-Jimenez T., Salvador-Ullauri L., Acosta-Vargas P., Espinoza W. I. Application to Guide People with Visual Disability on Internal Buildings, Using Beacon Bluetooth Positioning Systems. *Advances in Human Factors in Communication of Design : Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Communication of Design*, July 24–28, 2019. Cham : Springer, 2020. Vol. 972. P. 375–382. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19135-1_37.
18. NLB's Grab-n-Go Makes Borrowing Books Even Easier. *NLB*. 2023. 24 May. URL: <https://www.nlb.gov.sg/main/about-us/press-room-and-publications/media-releases/2022/nlbs-grab-n-go-makes-borrowing-books> (дата звернення: 10.04.2026).
19. Rathod M. S. G. The Rise of Smart Libraries: Integrating IoT, Cloud Services, and AI for Next-Gen Learning Spaces. *International Journal of Research in Library Science*. 2025. Vol. 11, No. 2. P. 210–226. DOI: <https://doi.org/10.26761/ijrls.11.2.2025.1883>.
20. Rudolph A. Wolf Pack Map – a new resource is available to help navigate around the University campuses and locations. *Nevada Today*. 2024. URL: <https://www.unr.edu/nevada-today/news/2024/wolf-pack-map> (дата звернення: 10.02.2026).
21. Shahzad K., Khan S. A., Iqbal A. Factors influencing the adoption of Internet of Things (IoT) in university libraries: a systematic literature review (SLR). *The Electronic Library*. 2024. Vol. 42, No. 2. P. 255–287. DOI: <https://doi.org/10.1108/EL-07-2023-0174>.
22. Shukla A. RFID Smart Shelf: Smart Library and Efficient Library Operations. *EnCstore.com*. 2023. URL: <https://www.encstore.com/blog/5376-rfid-smart-shelf-smart-library-and-efficient-library-operations> (дата звернення: 10.02.2026).
23. Spaniola N. RFID & EAS: The Key Differences. *Lowry Solutions*. 2022. URL: <https://lowrysolutions.com/blog/rfid-eas/> (дата звернення: 10.02.2026).
24. Tang M., Chen J., Chen H. Smart bookshelf for library book management. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*. 2020. Vol. 57(1). e396. DOI: <https://doi.org/10.1002/pras.2396>.
25. Viji C., Najmusher H., Rajkumar N., Mohanraj A., Nachiappan B., Neelakandan C., Jagajeevan R. Intelligent Library Management Using Radio Frequency Identification. *AI-Assisted Library Reconstruction* / ed. K. R. Senthilkumar. Hershey : IGI Global, 2024. P. 126–143.
26. What Is the Difference Between EAS and RFID Tags? *EAM*. 2025. 18 August. URL: <https://www.eaminc.com/blog/what-is-the-difference-between-eas-and-rfid-tags/> (дата звернення: 10.02.2026).
27. Xu H., Liu W., Li L., Zhou Q. An IoT-based low-cost architecture for smart libraries using SDN. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 7022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57484-2>.

References

1. Antonenko, D. S. (2024). "Smart Library" as an Innovative Concept of Library Science. *Visnyk of Kharkiv State Academy of Culture*, 66, 89–99. <https://doi.org/10.31516/2410-5333.066.07> [in Ukrainian].
2. Antonenko, D. S. (2024). Smart-Library: technological approaches. In *The process and dynamics of the scientific path* : Proceedings of the VII International Scientific and Theoretical Conference, Athens, November 22, 2024. International Center of Scientific Research, 398–401. <https://doi.org/10.36074/scientia>

22.11.2024 [in Ukrainian].

3. Bykov, O. M., & Savchenko, V. V. (2024). Personal data protection in modern legislation. *Legal Bulletin*, 14, 67–72. <https://doi.org/10.31732/2708-339X-2024-14-A9> [in Ukrainian].

4. Humenchuk, A. (2020). Librarian 4.0 digital competency system. *Bulletin of the Book Chamber*, 2, 23–28. [https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.2\(283\).23-28](https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.2(283).23-28) [in Ukrainian].

5. Applications and benefits of the RFID library management system. (2026). RFIDSilicone. <https://www.rfidsilicone.com/uk/blog/applications/rfid-library-management-system-applications-and-benefits.html> [in Ukrainian].

6. Kulish, Yu. O. (2023). Stvorennia smart-bibliotek za dopomohoiu Internetu rechei yak perspektyvnyi napriam rozvytku informatsiino-osvitnoho seredovyshcha universytetu. In *Information and Society: Collection of Materials of the 8th International Scientific and Practical Conference*, Vinnytsia, June 2, 2023. Vasyli' Stus Donetsk National University, 111–113 [in Ukrainian].

7. Matviienko, O., & Tsyvin, M. (2020). "IT-librarians": searching ways of innovation, labor mobility, or change of professional principles development? *Bulletin of the Book Chamber*, 3, 25–30. [https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.3\(284\).25-30](https://doi.org/10.36273/2076-9555.2020.3(284).25-30) [in Ukrainian].

8. Mikhailov, I. O., & Partyka, S. O. (2022). Models and examples of using RFID technologies. In *Modern directions of development of information and communication technologies and management tools: abstracts of the Twelfth International Scientific and Technical Conference*, April 27–28, 2022. Petrov V. V., Vol. 1, 64 [in Ukrainian].

9. Smart RFID library system – digital library management using RFID. (n.d.). Tekhnotreid. <http://uarfid.kiev.ua/ua/statji/rozumna-bibliotechna-sistema-rfid-tsifrove-upravlinnya-bibliotekoyu-za-dopomogoyu-rfid/> [in Ukrainian].

10. Adewojo, A. A., & Monjolaoluwa, O. P. (2025). Smart library environments: IoT and automation for next-generation services. *Business Information Review*, 42(4), 232–237. DOI: <https://doi.org/10.1177/02663821251384884> [in English].

11. Axelsson, M. (2019, July 23). The Little Robot that Lived at the Library. Futurice. Retrieved from: <https://www.futurice.com/blog/the-little-robot-that-lived-at-the-library> [in English].

12. Damayanti, T. N., Ramadan, D. N., & Utami, I. M. (2022). MyLib: Smart library indoor navigation using bluetooth low energy with triangulation method. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 68(2), 293–298 [in English].

13. Ferreira, J. C., Resende, R., & Martinho, S. (2018). Beacons and BIM Models for Indoor Guidance and Location. *Sensors*, 18(12), 4374. <https://doi.org/10.3390/s18124374> [in English].

14. Global Transformation Through RFID Library Technology: Real Case Studies from Singapore and Rotterdam. (n.d.). Custom RFID Tags. Retrieved from: <https://custom-rfid-tags.com/rfid-library-tags-for-book/> [in English].

15. Indoor Navigation System for Accessible Friendly Services and Facilities in the Library. (n.d.). Mada Innovation Program. Retrieved from: <https://mip.mada.org.qa/focused-area-use-cases/library/indoor-navigation-system-for-accessible-friendly-services-and-facilities-in-the-library/> [in English].

16. Kainunkangas, S. (2013). RFID-tekniikka ja sen hyödyntäminen kirjastoissa : ammattikorkeakoulun opinnäytetyö / Hämeen ammattikorkeakoulu. Valkeakoski, 37. Retrieved from: <https://www.theseus.fi/handle/10024/63885> [in English].

17. Lara-Alvarez, P., Jadán-Guerrero, J., Guevara-Maldonado, C. B., Sanchez-Gordon, S., Calle-Jimenez, T., Salvador-Ullauri, L., Acosta-Vargas, P., & Espinoza, W. I. (2020). Application to Guide People with Visual Disability on Internal Buildings, Using Beacon Bluetooth Positioning Systems. In *Advances in Human Factors in Communication of Design: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Communication of Design*, July 24–28, 2019. Springer, 972, 375–382. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19135-1_37 [in English].

18. NLB's Grab-n-Go Makes Borrowing Books Even Easier. (2023, May 24). NLB. Retrieved from: <https://www.nlb.gov.sg/main/about-us/press-room-and-publications/media-releases/2022/nlbs-grab-n-go-makes-borrowing-books> [in English].

19. Rathod, M. S. G. (2025). The Rise of Smart Libraries: Integrating IoT, Cloud Services, and AI for Next-Gen Learning Spaces. *International Journal of Research in Library Science*, 11(2), 210–226. <https://doi.org/10.26761/ijrls.11.2.2025.1883> [in English].

20. Rudolph, A. (2024). Wolf Pack Map – a new resource is available to help navigate around the University campuses and locations. Nevada Today. Retrieved from: <https://www.unr.edu/nevada-today/news/2024/wolf-pack-map> [in English].

21. Shahzad, K., Khan, S. A., & Iqbal, A. (2024). Factors influencing the adoption of Internet of Things (IoT) in university libraries: a systematic literature review (SLR). *The Electronic Library*, 42(2), 255–287. <https://doi.org/10.1108/EL-07-2023-0174> [in English].

22. Shukla, A. (2023). RFID Smart Shelf: Smart Library and Efficient Library Operations. EnCstore.com. Retrieved from: <https://www.encstore.com/blog/5376-rfid-smart-shelf-smart-library-and-efficient-library-operations> [in English].

23. Spaniola, N. (2022). RFID & EAS: The Key Differences. Lowry Solutions. <https://lowrysolutions.com/blog/rfid-eas/> [in English].

24. Tang, M., Chen, J., & Chen, H. (2020). Smart bookshelf for library book management. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, 57(1), e396. <https://doi.org/10.1002/pr2.396> [in English].

25. Viji, C., Najmusher, H., Rajkumar, N., Mohanraj, A., Nachiappan, B., Neelakandan, C., & Jagajeevan, R. (2024). Intelligent Library Management Using Radio Frequency Identification. In K. R. Senthilkumar (Ed.), *AI-Assisted Library Reconstruction*. IGI Global, 126–143 [in English].

26. What Is the Difference Between EAS and RFID Tags? (2025, August 18). EAM. <https://www.eaminc.com/blog/what-is-the-difference-between-eas-and-rfid-tags/> [in English].

27. Xu H., Liu W., Li L., Zhou Q. (2024). An IoT-based low-cost architecture for smart libraries using SDN. *Scientific Reports*, 14, 7022. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57484-2> [in English].

Стаття надійшла до редакції 06.03.2026
Отримано після доопрацювання 10.04.2026
Прийнято до друку 22.04.2026
Опубліковано 25.05.2026