

Internet rzeczy w nowoczesnym leśnictwie

Internet of Things in Modern Forestry

Miłosz Mielcarek¹ , Krzysztof Stereńczak¹ , Andrzej Talarczyk^{2,3} , Adam Konieczny^{2,3}, Longina Sobolewska²¹Zakład Geomatyki, Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary,
ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn
e-mail: m.mielcarek@ibles.waw.pl; k.sterenczak@ibles.waw.pl²TAXUS IT Sp. z o.o.,
ul. Płomyka 56A, 02-491 Warszawa
e-mail: andrzej.talarczyk@taxusit.pl; adam.konieczny@taxusit.pl; longina.sobolewska@taxusit.pl³Fundacja Centrum Badań nad Lasem i Zasobami Przyrodniczymi,
ul. Płomyka 56A, 02-491 Warszawa
e-mail: fundacja@las.org.pl

Abstract. Modern forestry faces significant challenges related to climate change and the need for sustainable management. Traditional forest monitoring methods are often insufficient for rapid responses to threats such as fires or pest outbreaks. This article presents the concept of the Internet of Things (IoT) as a technological solution to these challenges. It discusses how networks of environmental and acoustic sensors, integrated within "Smart Forest" systems, enable continuous and automated data collection. The text also introduces the idea of Digital Twins – advanced virtual models that support precise planning and decision-making by combining data from IoT and remote sensing. Furthermore, the article provides examples of IoT implementations in Poland and worldwide, outlining the key opportunities and barriers associated with implementing this technology in forestry.

Słowa kluczowe: Internet rzeczy, IoT, leśnictwo, SILVA NYMPHA, cyfrowy bliźniak

Keywords: Internet of Things, IoT, forestry, SILVA NYMPHA, Digital Twin

1. Wstęp

Las to najbardziej złożony i dynamiczny ekosystem lądowy. Współczesna gospodarka leśna na całym świecie staje przed coraz większymi wyzwaniami związanymi nie tylko ze zmianami klimatu (rosnącym ryzykiem długotrwałych susz, pożarów czy masowego pojawiania się szkodników), ale także koniecznością prowadzenia zrównoważonej gospodarki leśnej – czyli takiej, która łączy ochronę przyrody z zaspokajaniem potrzeb człowieka. Żeby skutecznie chronić lasy i mądrze nimi zarządzać, potrzebujemy dokładnych i aktualnych informacji o tym, co się w nich dzieje. Tradycyjne metody pomiarowe – choć sprawdzone – często są czasochłonne i kosztowne. Ręczne zbieranie danych, cykliczne kontrole oraz analiza pozyskanych informacji to działania wymagające dużych nakładów pracy. Trudno też w ten sposób efektywnie zaplanować działania, ponieważ brakuje dokładnych i aktualnych informacji z terenu. To sprawia, że zasoby (ludzie, sprzęt, pieniądze) nie zawsze są wykorzystywane tam, gdzie są naprawdę potrzeb-

ne, a reakcja na zagrożenia, takie jak pożary czy gradacje szkodników, nie zawsze jest odpowiednio szybka.

Jak zatem skutecznie monitorować ogromne, rozproszone i często trudno dostępne przestrzenie leśne? Odpowiedzią może być technologia. W lasach na całym świecie zachodzi właśnie niezauważalna rewolucja. Choć często nie widać tego gołym okiem, to współczesne technologie, m.in. dzięki miniaturyzacji i łączności bezprzewodowej zaczynają odgrywać coraz większą rolę w monitorowaniu lasów i zarządzaniu nimi. Dzięki niewielkim urządzeniom, często ukrytym wśród liści, w ściółce lub w koronach drzew, leśnicy pozyskują dane, których analiza dostarcza wielu cennych informacji o ekosystemach leśnych i procesach w nich zachodzących. Rozwój technologiczny i szersze wykorzystanie czujników w lesie wiąże się z nowym, także w lasach, pojęciem – Internetem Rzeczy – znanym pod angielskim skrótem IoT (ang. Internet of Things).

2. Czym jest Internet Rzeczy (IoT) i dlaczego może być przydatny w lesie

Internetem Rzeczy (w dużym uproszczeniu) można nazwać koncepcję polegającą na tym, że urządzenia – czujniki, kamery, stacje pomiarowe – potrafią komunikować się między sobą oraz z centralnym systemem, bez udziału człowieka. Te „inteligentne” urządzenia zbierają dane z otoczenia, przesyłają je przez różne sieci (np. Bluetooth, Wi-Fi, LTE czy sieci satelitarne), a następnie dane te są przetwarzane i analizowane w określonym celu. Dobrym przykładem wykorzystania tej technologii są gospodarstwa domowe, gdzie IoT jest obecny już od dłuższego czasu, np. w postaci „inteligentnego” sprzętu AGD (lodówek, odkurzaczy, itp.). Teraz podobna technologia trafia do środowiska leśnego, gdzie, w zależności od celu, zastosowania IoT mogą przyjmować wiele form. Przykładowo:

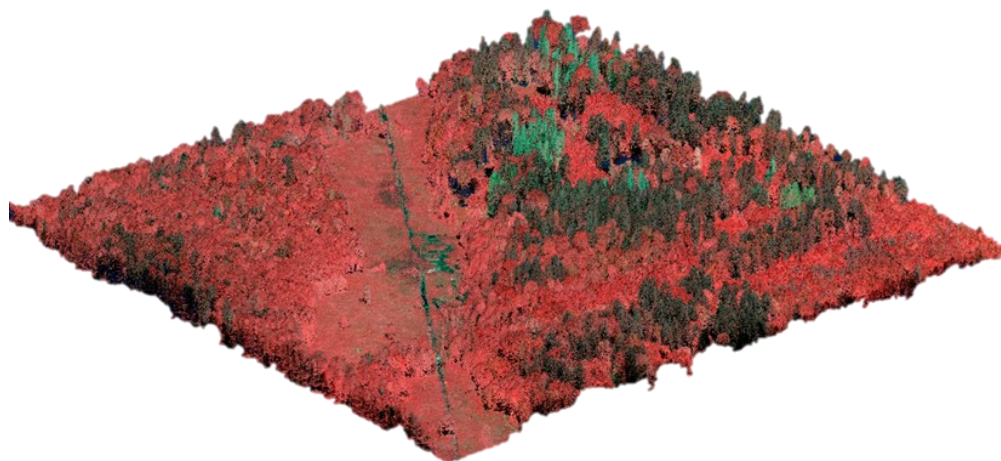
- *Czujniki środowiskowe* mierzą temperaturę powietrza, wilgotność względną, poziom wilgoci w glebie i ściółce, a nawet obecność określonych gazów czy zawiesin (np. dwutlenku węgla czy dymu). Dzięki temu możliwe jest monitorowanie warunków sprzyjających np. rozwojowi szkodników lub ryzyku pożarowemu,
- *Czujniki akustyczne*, rozlokowane w koronach drzew, potrafią nasłuchiwać dźwięków charakterystycznych dla nielegalnego wycięcia (np. dźwięku piły łańcuchowej), a także odgłosów dzikich zwierząt – pomagając w ich obserwacji i ochronie,
- *Kamery, rejestratory dźwięku i fotopułapki*, połączone z siecią, automatycznie przesyłają zdjęcia i nagrania do serwerów, gdzie mogą być analizowane przez algorytmy rozpoznające gatunki zwierząt czy wykrywające niebezpieczeństwo (np. ogień).

Dlaczego leśnicy widzą tak ogromny potencjał IoT w monitorowaniu środowiska leśnego? Przede wszystkim, technologia ta umożliwia automatyzację i ciągłość pomiarów. Dane są zbierane 24 godziny na dobę, dostarczają aktualnych i dokładnych informacji na temat różnych parametrów środowiskowych i zaburzeń, dzięki czemu działania zaradcze mo-

gą być podejmowane nie tylko szybciej, ale i z większą precyzją. Ponadto, takie systemy mogą znacząco zmniejszać pracochłonność wielu czynności leśnych, oszczędzając czas i zasoby. Należy podkreślić, iż wykorzystanie IoT w leśnictwie to nie tylko nowoczesna technologia pomiarowa, setki czujników, petabajty danych – to także zmiana filozofii zarządzania zasobami przyrody. Dzięki integracji danych z czujników, zdjęć lotniczych, modeli 3D (ryc. 1) i systemów GIS (ang. Data Fusion lub Data Integration) możliwe jest bardziej świadome, precyzyjne i zrównoważone podejmowanie decyzji, co w obliczu zmian klimatycznych oraz zagrożeń z nimi związanych ma niebagatelne znaczenie dla gospodarowania przyrodą i jej ochrony.

Koncepcja „Smart Forest”, czyli inteligentnego lasu, funkcjonuje już w wielu krajach. Przykłady wdrożeń pokazują, że technologia może skutecznie służyć przyrodzie:

- Dryad Network (Niemcy) opracowuje sieć czujników bezprzewodowych do wykrywania pożarów lasów w ich wczesnej fazie. Ich urządzenia działają bez dostępu do prądu, komunikując się poprzez specjalne sieci typu LoRaWAN, a dane przesyłają do chmury,
- Rainforest Connection (USA) wykorzystuje zasilane energią słoneczną czujniki akustyczne, w tropikalnych lasach deszczowych. Potrafią one wykrywać nielegalne wycinki i dźwięki pojazdów, przesyłając dane do specjalnych centrów monitoringu,
- AFRY Smart Forestry (Szkocja) wdraża kompleksowe rozwiązania cyfrowe dla leśnictwa, integrując dane z czujników, dronów i satelitów z systemami zarządzania lasami. Umożliwia to podejmowanie decyzji w oparciu o aktualne i precyzyjne dane terenowe,
- Forest 4.0 (Litwa) to projekt zakładający rozwój cyfrowych narzędzi do zarządzania lasami, w tym systemów predykcyjnych analizujących ryzyko pożarowe i zmiany klimatyczne,
- Kinéis (Francja) rozwija systemy czujników IoT, które komunikują się z satelitami i mogą być rozmieszczone w odległych regionach pozbawionych zasięgu sieci komórkowych. Pozwalają one m.in. na wczesne wykrywanie pożarów.



Rycina 1. Fragment chmury punktów pochodzącej z lotniczego skanowania laserowego
Figure 1. A fragment of a point cloud from airborne laser scanning

3. IoT w polskich lasach

Choć Internet Rzeczy w kontekście polskich lasów może brzmieć jak pieśń przyszłości, to w rzeczywistości w naszych lasach już dziś działa wiele rozwiązań, które wpisują się w tę ideę. Dobrym przykładem jest tu sieć automatycznych stacji meteorologicznych, którą dysponują Lasy Państwowe. Poprzez pomiar parametrów takich jak wilgotność powietrza, temperatura, opady czy prędkość wiatru, dostarczają one niezwykle cennych informacji, nie tylko dla leśników planujących zabiegi gospodarcze, ale też dla straży pożarnej czy naukowców badających wpływ zmian klimatu. W lasach działa także rozbudowany system monitorowania zagrożenia pożarowego – sieć kamer i wież obserwacyjnych, które pomagają szybko wykrywać zarzewia ognia, a następnie informować o tym odpowiednie służby. Coraz bardziej „smart” stają się też szkółki leśne. Znajdują się tam czujniki temperatury i wilgotności, a niekiedy także automatyczne systemy nawadniania, które reagują na warunki atmosferyczne w czasie rzeczywistym. To tylko niektóre przykłady systemów wykorzystywanych w Lasach Państwowych, które mają znamiona IoT.

W polskich lasach podejmowane są kolejne próby, mające na celu wdrożenie technologii IoT na krajowe podwórko. Przykładem jest projekt SILVA NYMPHA, gdzie podjęto się zadania stworzenia prototypu rozwiązania wykorzystującego IoT do monitorowania zagrożeń biotycznych i abiotycznych lasu poprzez połączenie danych zbieranych przez czujniki (np. tem-

peraturę, wilgotność powietrza i gleby, nasłonecznienie) z obrazami pozyskiwanymi z różnych źródeł – takich jak drony, czy satelity (ryc. 2).

Choć nie wszystkie te systemy są jeszcze ze sobą połączone, mają ogromny potencjał. W przyszłości dane z czujników mogą trafiać w czasie rzeczywistym do jednej wspólnej platformy – dostępnej np. przez aplikację mobilną – co pozwoliłoby na jeszcze szybsze i trafniejsze decyzje w terenie.

4. Digital Twins, czyli cyfrowe bliźniaki lasów

Mianem „cyfrowego bliźniaka lasu” określa się dynamiczny, stale aktualizowany wirtualny model rzeczywistego ekosystemu leśnego. To zaawansowane narzędzie integrujące i analizujące ogromne ilości danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Dzięki niemu leśnicy mogą zyskać kompleksowy wgląd w stan lasu, przewidywać zmiany i podejmować bardziej świadome decyzje. Idea cyfrowego bliźniaka wychodzi poza proste zbieranie surowych danych z czujników. Sama informacja o temperaturze czy wilgotności ma charakter punktowy i ograniczony. Prawdziwą wartość daje dopiero analiza i interpretacja tych danych w kontekście szerszych zbiorów informacji, co przekłada się na konkretną wiedzę i możliwość działania. To właśnie ta pogłębiona analiza, wspierana przez zaawansowane algorytmy, pozwala przekształcić strumień danych w użyteczne informacje, niezbędne do efektywnego zarządzania lasami.



Rycina 2. Schemat systemu IoT powstającego w ramach projektu SILVA NYMPHA

Figure 2. Diagram of the IoT system being developed as part of the SILVA NYMPHA project

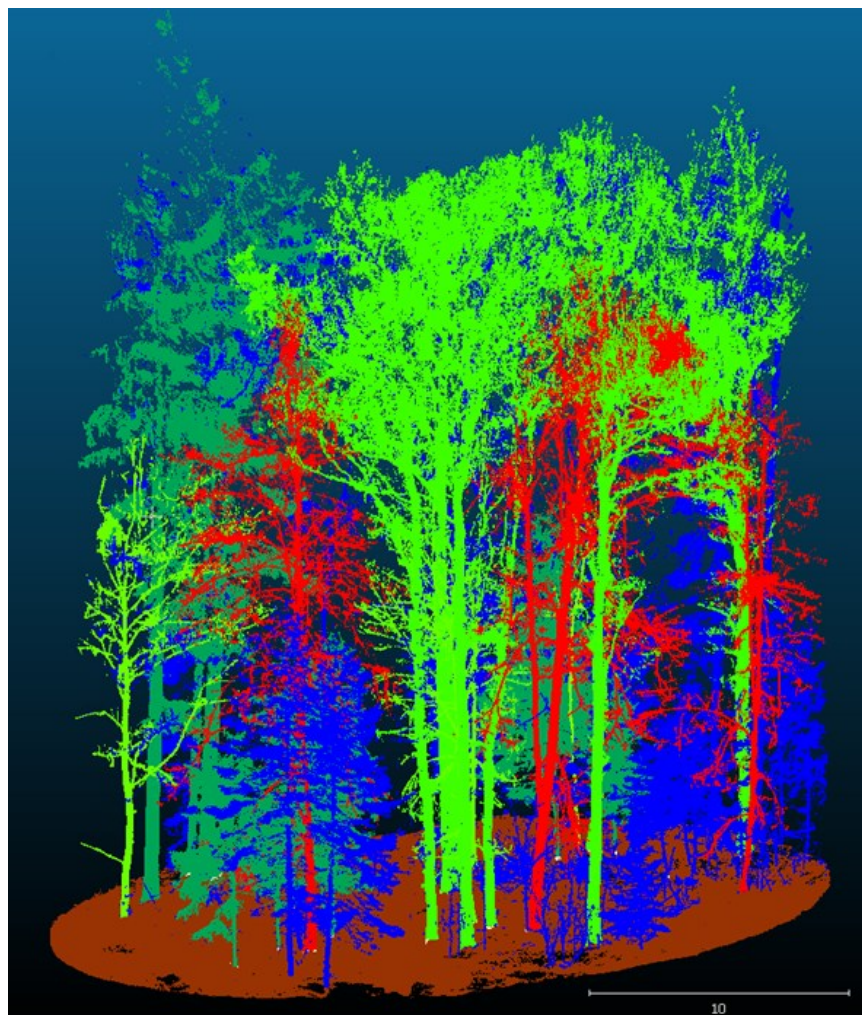
Powstanie cyfrowego bliźniaka lasu to proces integracji danych pochodzących z wielu źródeł (ryc. 3). Obejmuje to integrację danych z systemów teledetekcji (RS), takich jak skanowanie laserowe (LiDAR), zdjęcia lotnicze, ortofotomapy, a także informacji zbieranych na bieżąco przez czujniki IoT rozmieszczone w terenie. Ogromne ilości zgromadzonych danych są następnie przetwarzane przez zaawansowane algorytmy analizy i uczenia maszynowego. To właśnie te algorytmy są sercem cyfrowego bliźniaka, ponieważ pozwalają na identyfikowanie wzorców, wykrywanie anomalii, przewidywanie zagrożeń (np. pożarów, inwazji szkodników, chorób drzew) oraz dostarczanie kompleksowych informacji wspierających procesy decyzyjne. Korzyści płynące z zastosowania cyfrowych bliźniaków są znaczące. Umożliwiają one predykcję zagrożeń, co pozwala na wczesne reagowanie i minimalizowanie strat. Wspierają planowanie gospodarki leśnej, optymalizując pozyskanie drewna, nasadzenia i inne działania. Dodatkowo oferują interaktywną wizualizację stanu lasu, co ułatwia zrozumienie złożonych zależności i przedstawianie wyników analiz szerokiemu gronu odbiorców.

Przykładem zastosowania IoT w praktyce może być wykorzystanie danych klimatycznych do modelowania miąższości drzewostanów. W pracy Tangwa i in. (2025), wykorzystano zmienne określone na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego (ALS), danych siedliskowych i klimatycznych

do modelowania zasobności wraz ze sprawdzeniem możliwości przenoszenia stworzonych modeli w czasie. W efekcie przeprowadzonych prac wykazano, że integracja danych ALS z danymi klimatycznymi i siedliskowymi poprawia dokładność szacowania. Praca potwierdza zasadność wykorzystywania istniejących danych klimatycznych i siedliskowych po wcześniejszym ich zintegrowaniu w jednym systemie informatycznym.

5. Przyszłość IoT w lasach – szanse i wyzwania

Technologie Internetu Rzeczy otwierają przed leśnictwem szereg ogromnych szans, które mogą zrewolucjonizować sposób zarządzania lasami. Kluczową korzyścią jest możliwość bieżącego monitorowania ekosystemów leśnych, co może przełożyć się na wczesne wykrywanie potencjalnych zagrożeń. IoT stwarza również podstawy do budowy zaawansowanych systemów wspierania decyzji w zakresie gospodarki leśnej. Zebrane dane, przy zastosowaniu właściwych rozwiązań informatycznych, mogą być źródłem kompleksowych informacji niezbędnych do optymalizacji procesów odnowienia lasów. Istotnym atutem jest rozwój sieci mesh, które umożliwiają urządzeniom komunikowanie się ze sobą bez potrzeby zasięgu GSM, co jest kluczowe w trudno dostępnych obszarach leśnych. Co więcej, ciągły postęp technologiczny – w tym miniaturyzacja czujników, zwiększanie



Rycina 3. Prototyp cyfrowego bliźniaka lasu na bazie chmury punktów TLS

Figure 3. Prototype of a digital twin of a forest based on a TLS point cloud

żywołności baterii, rozwój łączności satelitarnej oraz integracja z algorytmami sztucznej inteligencji – otwiera drogę do jeszcze dokładniejszych prognoz i bardziej precyzyjnego zarządzania.

Mimo obiecujących perspektyw, wdrożenie IoT w leśnictwie wiąże się z licznymi wyzwaniami. Jedną z głównych barier są koszty – zarówno zakupu, instalacji sprzętu, jak i jego serwisowania. Leśne środowisko jest surowe, co wymaga trwałości sprzętu odpornego na warunki atmosferyczne i uszkodzenia mechaniczne. Problemem pozostaje także łączność w oddalonych rejonach, gdzie dostęp do sieci komórkowych jest ograniczony lub niemożliwy – choć sieci mesh częściowo rozwiązują ten problem. Kolejnym wyzwaniem jest konieczność zasilania sensorów, zwłaszcza tych umieszczonych głęboko w lesie, gdzie dostęp do źródeł energii jest utrudniony. Ważną kwestią, która wymaga pilnej uwagi, jest potrzeba standaryzacji protokołów komunikacyjnych i formatów danych, a także integracji z istniejącymi systemami informatycznymi Lasów Państwowych. Bez spójnych standardów i płynnej integracji, pełne wykorzystanie potencjału IoT w zarządzaniu leśnictwem będzie utrudnione.

6. Podsumowanie

Dostęp do ogromnych ilości danych to dziś codzienność w wielu dziedzinach. Nie zawsze jest to jednak wartość sama w sobie – sztuczna inteligencja czy zaawansowane algorytmy nie są w stanie w magiczny sposób przekształcić chaotycznych danych w sensowne i użyteczne wnioski. Dlatego w centrum pozostaje człowiek – specjalista, który rozumie zależności rządzące ekosystemem i potrafi zaplanować, jakie dane, w jakiej skali i z jaką częstotliwością zbierać, aby uzyskać obraz lasu jak najbliższy rzeczywistości. Dla takiego fachowca cyfrowy „model lasu” może być znakomitą uzupełnieniem obserwacji terenowych, umożliwiającym wczesne wykrywanie zmian i sygnalizowanie zagrożeń zarówno w krótkim, jak i długim horyzoncie czasowym. Ostatecznie to jednak wiedza i doświadczenie leśnika decydują, ponieważ las wciąż wymyka się sztywnym schematom.

Las jest środowiskiem trudnym do „oczujnikowania” ze względu na jego dynamikę i złożoność. Niemniej w polskich Lasach Państwowych istnieje infrastruktura, którą można wykorzystać i rozbudować, aby prowadzić dodatkowe pomiary bez nadmiernej ingerencji w środowisko. Stacje meteorologiczne, wieże przeciwpożarowe, pułapki feromonowe, a także obiekty drogowe czy turystyczne to naturalne punkty instalacji nowych sensorów. Pełniejszy obraz ekosystemu wymaga też czujników w glebie, ciekach wodnych czy wewnątrz drzewostanów, ale dzięki ich miniaturyzacji i energooszczędności wpływ na środowisko staje się coraz mniej odczuwalny.

Ogromną zaletą cyfrowych systemów jest możliwość integracji danych z wielu źródeł i ich odniesienia do wspólnych jednostek przestrzennych. Nie jest to trywialne, gdy dane pochodzą z różnych „światów” – czujników punktowych IoT, teledetekcji satelitarnej o charakterze rastrowym czy rejestrów gospodarczych powiązanych z wydzienieniami leśnymi. Z pomocą przychodzą tu technologie GIS oraz starannie zaprojektowane jednostki analizy przestrzennej, do których można przeliczać różne formaty i skale

danych. Dzięki temu dla każdego fragmentu lasu można zestawić pełny obraz: historyczny, aktualny i przewidywany w przyszłości.

Rozwiązania IoT pozwalają na ciągły monitoring z wielu punktów jednocześnie, również w miejscach trudno dostępnych dla człowieka. Regularne, zautomatyzowane pomiary, integrowane z danymi historycznymi i obserwacjami terenowymi, umożliwiają szczegółowe śledzenie procesów zachodzących w ekosystemie. To z kolei daje szansę na szybkie wykrywanie zagrożeń biotycznych i abiotycznych, podejmowanie działań ochronnych, zanim szkody się nasilą, a także lepsze planowanie działań gospodarczych. Zbierane w ten sposób wielowymiarowe dane pozwalają tworzyć bardziej realistyczne modele ekosystemu – obejmujące nie tylko drzewostan, ale całość zależności przyrodniczych. Tym samym technologie IoT wspierają zrównoważone zarządzanie lasem, łącząc ochronę przyrody z racjonalnym wykorzystaniem jej zasobów.

Podziękowania

Serdeczne podziękowania dla całego zespołu projektowego SILVA NYMPHA.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Źródła finansowania badań

Tekst powstał w ramach projektu: „Zrównoważone użytkowanie i inteligentne zarządzanie lasami”, akronim: SILVA NYMPHA, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach V konkursu Współpracy Polska-Turcja, realizowanego na podstawie umowy nr POL-TUR5/2022/45/SILVA NYMPHA/2023, z dnia 01.12.2023 r. przez konsorcjum Politechniki Wrocławskiej, Instytutu Badawczego Leśnictwa oraz TAXUS IT Spółki z o.o.

<https://silva-nympha.pwr.edu.pl/>

<https://www.ibles.pl/projekt/zrownowazone-uzytkowanie-i-inteligentne-zarzadzanie-lasami-akronim-silva-nympha/>

Wkład autorów

K.S., M.M. – koncepcja, M.M. – przygotowanie pierwszej wersji tekstu, K.S., M.M., A.T., A.K., L.S. – opracowanie finalnej wersji tekstu; M.M., K.S., A.T. – korekta tekstu.

Literatura

Tangwa E., Tracz W., Erfanifard Y., Mielcarek M., Stereńczak K. 2025. Enhancing Airborne Laser Scanning-Based Growing Stock Volume Models with Climate and Site-Specific Information, *Forests* 16 (5): 815. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16050815>.