

ANNA KOŁTON¹ , **MONIKA CZAJA²**

* Autor korespondencyjny /corresponding author: email: anna.kolton@urk.edu.pl

¹ Katedra Botaniki, Fizjologii i Ochrony Roślin, Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa,
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, Polska

Department of Botany, Physiology and Plant Protection, Faculty of Biotechnology and Horticulture,
University of Agriculture in Krakow, al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, Poland

² Katedra Roślin Ozdobnych i Sztuki Ogrodowej, Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa,
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, Polska

Department of Ornamental Plants and Garden Art, Faculty of Biotechnology and Horticulture,
University of Agriculture in Krakow, al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, Poland

Środowisko miejskie i człowiek źródłem stresu dla drzew. Nowe wyzwania w obliczu rosnącego problemu zanieczyszczenia światłem

**Urban environment and humans activity as a source of stress for trees.
New challenges in the face of the growing problem of light pollution**

DOI: <https://doi.org/10.12775/KOSMOS.2025.020>

Abstrakt

Środowisko miejskie stanowi wyjątkowo trudne miejsce do życia dla roślin. Z jednej strony rośliny zarówno zielne, jak i drzewiaste są przez mieszkańców miast pożądanym elementem zurbanizowanego krajobrazu. Świadomość licznych korzyści jakie niesie ze sobą zieleń miejska wzrasta, również ze względu na szeroką dokumentację naukową w tym zakresie. Z drugiej jednak strony warunki wzrostu i rozwoju są na obszarach miejskich wyjątkowo trudne, co wpływa na obniżenie zdrowotności i jakości zieleni.

Co więcej, w wyniku intensywnej urbanizacji i dużego zagęszczenia populacji miast mamy do czynienia z nasileniem istniejących czynników stresowych, ale też z pojawianiem się nowych. W ostatnich latach dużą uwagę poświęca się rosnącemu problemowi zanieczyszczenia światłem. Choć jest to problem globalny, wciąż jest mało poznany, a jego skutki są nielicznie udokumentowane. Poniższe opracowanie skupia się na przybliżeniu aktualnego stanu wiedzy co do wpływu tego czynnika na fenologię, morfologię i funkcjonowanie roślin drzewiastych.

Słowa kluczowe: ekosystemy miejskie, antropopresja, drzewa miejskie, ALAN

Abstract

The urban environment is an extremely difficult place for plants to live. On the one hand, both herbaceous and woody plants are a desirable element of the urban landscape for city dwellers. Awareness of the numerous benefits of urban greenery is increasing, partly due to extensive scientific documentation in this area. On the other hand, however, the conditions for growth and development are extremely difficult in urban areas, which reduces the vitality and quality of greenery. What is more, as a result of intensive urbanisation and high population density in cities, we are faced with an intensification of existing stress factors, but also with the emergence of new ones. In recent years, much attention has been paid to the growing problem of light pollution. Although this is a global problem, it is still poorly understood and its effects are rarely documented. The following report focuses on presenting the current state of knowledge regarding the impact of this factor on the phenology, morphology and functioning of woody plants.

Key words: urban ecosystems, anthropogenic pressure, urban trees, ALAN

ROLA DRZEW W MIEŚCIE

Od zarania dziejów człowiek otaczał się roślinami zarówno w celu pozyskania cennych surowców, jak i dla przyjemności spędzania czasu wśród natury. Już w czasach starożytnych, podczas budowy pierwszych miast zakładano parki publiczne w celach rekreacyjnych (Forrest i in., 2005). Wśród roślin parkowych najczęściej uwagi zwracamy na drzewa. W przeszłości drzewa przede wszystkim traktowano jako źródło schronienia i pożywienia, ale również wykorzystywano jako źródło opału, materiał budulcowy w tym do budowy broni (Tudge, 2006). Jednocześnie im bardziej człowiek eksploatował lasy i im bardziej miasta w swojej strukturze oddalały się od naturalnych terenów, tym bardziej człowiek poszukiwał kontaktu z roślinami do odpoczynku i relaksu (Forrest i in., 2005). W ostatnich latach drzewa, a szczególnie te rosnące w miastach, zyskały zupełnie nowe funkcje bardzo istotne dla dobrostanu mieszkańców metropolii, pełniąc tak zwane usługi ekosystemowe lub ekologiczne (z ang. *ecosystem and ecological services*) (Czaja i in., 2020; Rötzer i in., 2020). Do tego

typu usług zaliczamy m.in. poprawę żyzności gleb, zatrzymywanie wody w glebie, zapobieganie erozji, regulację mikroklimatu, pochłanianie różnego rodzaju zanieczyszczeń, redukcję hałasu i efektu miejskiej wyspy ciepła. Jednocześnie tego typu nasadzenia zapewniają walory estetyczne, które z kolei wpływają na korzyści społeczne (Chakravarty i in., 2019). Przykłady usług świadczonych przez drzewa w mieście przedstawiono na Rycinie 1. Wiele informacji o korzyściach wynikających z obecności drzew w warunkach miejskich, ale także problemach związanych z ich występowaniem można znaleźć w literaturze (Salmond i in., 2016; Livesley i in., 2016; Drew-Smythe i in., 2023).

MIASTO JAKO ŹRÓDŁO STRESU DLA DRZEW

Drzewa w mieście służą człowiekowi na bardzo wiele sposobów jednak równocześnie muszą radzić sobie z wieloma czynnikami stresowymi (Czaja i in., 2020). Te stresy mogą wynikać z naturalnych procesów występujących w przyrodzie, jak np. ekstremalne temperatury (ujemne zimą i wysokie latem) czy ataki szkodni-



Ryc. 1. Usługi świadczone przez drzewa w mieście

ków i patogenów. Wiele czynników stresowych w miastach ma jednak pochodzenie antropogeniczne, tj. wynika pośrednio lub bezpośrednio z działalności człowieka (Lüttge i Buckeridge, 2020; Wilkaniec i in., 2020). Co ciekawe, drzewa potrafią regulować większość negatywnych efektów środowiskowych, które generuje miasto. Z jednej strony drzewa potrafią zatrzymać wodę w glebie i utrzymywać wilgotność powietrza, z drugiej strony często narażone są na suszę bądź powodzie występujące coraz częściej na terenach o słabej przepuszczalności (Czaja i in., 2020). Jednocześnie, co warto podkreślić, warunki miejskie jako środowisko życia roślin nie są jednorodne zarówno jeśli chodzi o stopień zabudowy, jak i przepuszczalność gruntu, temperaturę czy wilgotność gleby (Przeździecki i Zawadzki, 2023). W tkance miejskiej wyróżniamy zarówno środowiska takie jak ogrody przydomowe i parki, gdzie warunki dla wzrostu

drzew są lepsze niż na silnie przekształconych stanowiskach, jak np. wybetonowane skwery czy pasy przydrożne (Sæbø i in., 2005). Określa się stopień wpływu człowieka na zbiorowiska roślinne czy ekosystemy za pomocą wskaźnika hemerobii. Wskaźnik ten jest wyrażany na różnych skalach (Erdős i in., 2022; Hill i in., 2022). Popularna w użyciu jest 7-stopniowa skala hemerobii, gdzie 0 oznacza tereny naturalne, na które działalność człowieka nie miała wpływu (ahemerobia), a 7 oznacza tereny całkowicie przekształcone i zniszczone przez człowieka (metahemerobia) (Šantrůčková i in., 2025). Stopniom w skali hemerobii przypisuje się konkretne działania człowieka (Steinhardt i in., 1999) oraz klasy pokrycia terenu wyróżniane w programie CORINE Land Cover (CLC) (Jasnavičiūtė i Veitėkis, 2022; Šantrůčková i in., 2025). W obszarze miasta można wyróżnić zarówno obszary zbliżone do naturalnych (klasa 2 hemerobii –

oligohemerobia), jak i całkowicie przekształcone i zdegradowane (Steinhardt i in., 1999; Šantrůčková i in., 2025). Do obszarów zaliczanych do 2 klasy hemerobii wpisuje się np. lasy liściaste, lasy iglaste, lasy mieszane, bagna śródlądowe czy torfowiska. Do klasy 7 hemerobii zalicza się zabudowę miejską zwartą, tereny przemysłowe lub handlowe, tereny komunikacyjne i związane z komunikacją drogową i kolejową, porty i lotniska (GIOŚ CORINE Land Cover – CLC, 2025; Šantrůčková i in., 2025). Terenów zaliczanych do tych skrajnych klas zazwyczaj jest w miastach najmniej. Najwięcej natomiast pojawia się terenów zaliczanych do klasy 4 i 5 hemerobii (alfa i beta euhemerobia) oraz 6 (polihemerobia), gdzie wpływ człowieka jest opisywany jako silny i bardzo silny (Steinhardt i in., 1999; Šantrůčková i in., 2025). Część stresorów może być ograniczona w przypadku „lepszego stanowiska”, np. mniejsze zanieczyszczenie gleby terenów bardziej oddalonych od dróg (Phillips i in., 2021) czy wyższa wilgotność w parkach niż przy drogach (Mao i in., 2014). Pewna grupa czynników stresowych ma jednak tak duży zasięg, że trudno uniknąć ich skutków lokalnie w obrębie miasta, do takich czynników będą należeć efekty miejskiej wyspy ciepła (Tzavali i in., 2015) czy wszechobecne zanieczyszczenie światłem (Green i in., 2022). Stresy miejskie wpływają na wszystkie części drzew, zarówno te podziemne jak i nadziemne (Ryc. 2), a oddziaływanie na jeden obszar zaburza funkcjonowanie całego organizmu. Na przykład, nadmierne ubicie podłoża i gleby, co powoduje utrudnione pobieranie wody i składników mineralnych oraz zaburzone oddychanie korzeni, ogranicza funkcjonowanie także części nadziemnej drzew (Hiura i in., 2024; Zhu i in., 2021). Nie możemy zapominać, że jest to jeden organizm. Przykłady czynników stresowych pochodzenia antropogenicznego spotykanych w mieście i mających negatywny wpływ na drzewa ilustruje Rycina 3.

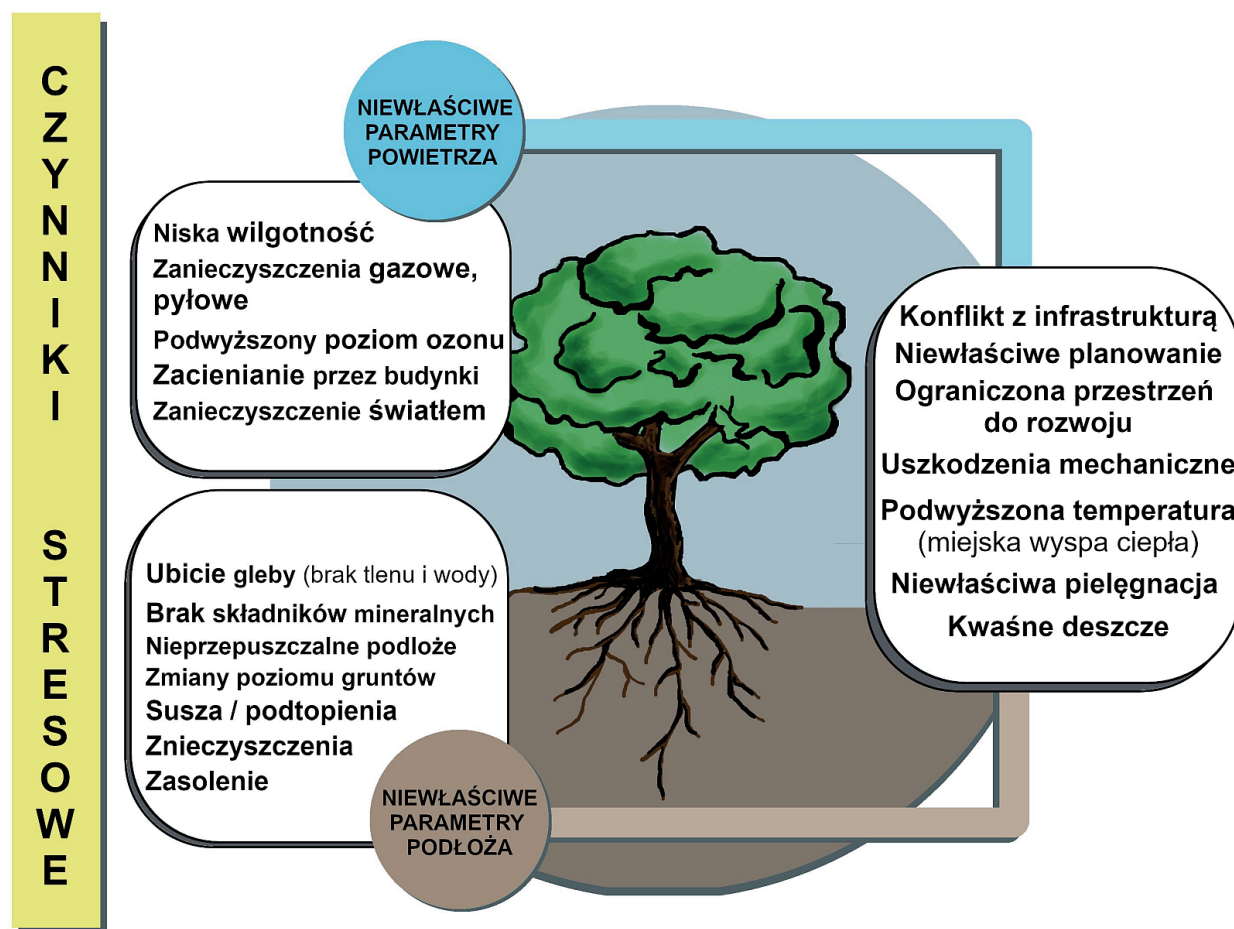
Prezentowana praca nie opisuje wszystkich czynników stresowych drzew występujących w mieście ze względu na dużą liczbę obszernych publikacji w tym temacie (Czaja i in., 2020; Lüttge i Buckeridge, 2020; Tan i Shibata, 2022). Poniższe opracowanie koncentruje

się na zagadnieniu zanieczyszczenia światłem, czynniku mało jeszcze poznanym i nieczęsto opisywanym w literaturze, choć globalnym i dotyczącym rośliny w centrach dużych miast, ale także na ich obrzeżach czy w mniejszych miejscowościach.

ZANIECZYSZCZENIE ŚWIATŁEM – MAŁO ZNANY CZYNNIK STRESOWY DLA DRZEW W MIEŚCIE

Zanieczyszczenie światłem jest uznawane jako problem globalny, poświęcono mu nawet cały numer specjalny w czasopiśmie *Science* (Science 2023, vol 380, issue 6650). Trudno jednak o jedną przyjętą przez ogół definicję tego zjawiska. We wstępie do wspomnianego numeru specjalnego *Science* możemy przeczytać, że zanieczyszczenie światłem to oświetlanie środowiska w czasie i miejscu gdzie jest to niepotrzebne, nadmierne, uciążliwe lub szkodliwe (Smith i in., 2023). W zasobach International Union for Conservation of Nature (Międzynarodowej Unii Ochrony Przyrody) możemy przeczytać, że zanieczyszczenie światłem to spowodowana przez człowieka zmiana poziomu natężenia światła w środowisku w porównaniu do warunków naturalnych, oznacza obecność niepożądanego, nieodpowiedniego lub nadmiernego oświetlenia sztucznego (IUCN, 2024). Natomiast w artykule na stronie Muzeum Historii Naturalnej (UK) można znaleźć informację, że zanieczyszczenie światłem to występowanie sztucznego światła w środowisku nocnym (Natural History Museum, 2025). Wszystkie źródła podkreślają, że jest to zanieczyszczenie wywołane przez działalność człowieka i jest szkodliwe zarówno dla ludzi, jak i innych organizmów oraz łatwo się rozprzestrzenia ze względu na naturę światła. Dla roślin drzewiastych w mieście stanowi szczególny problem, gdyż często źródła tego zanieczyszczenia (oprawy lamp ulicznych) znajdują się w bezpośrednim otoczeniu koron drzew (Ryc. 4).

Ponadto lampy uliczne nie stanowią jedynego źródła tego problemu w warunkach miejskich, światło ucieka z punktów oświetlenia budynków, parkingów, oświetlenia dekoracyjnego,



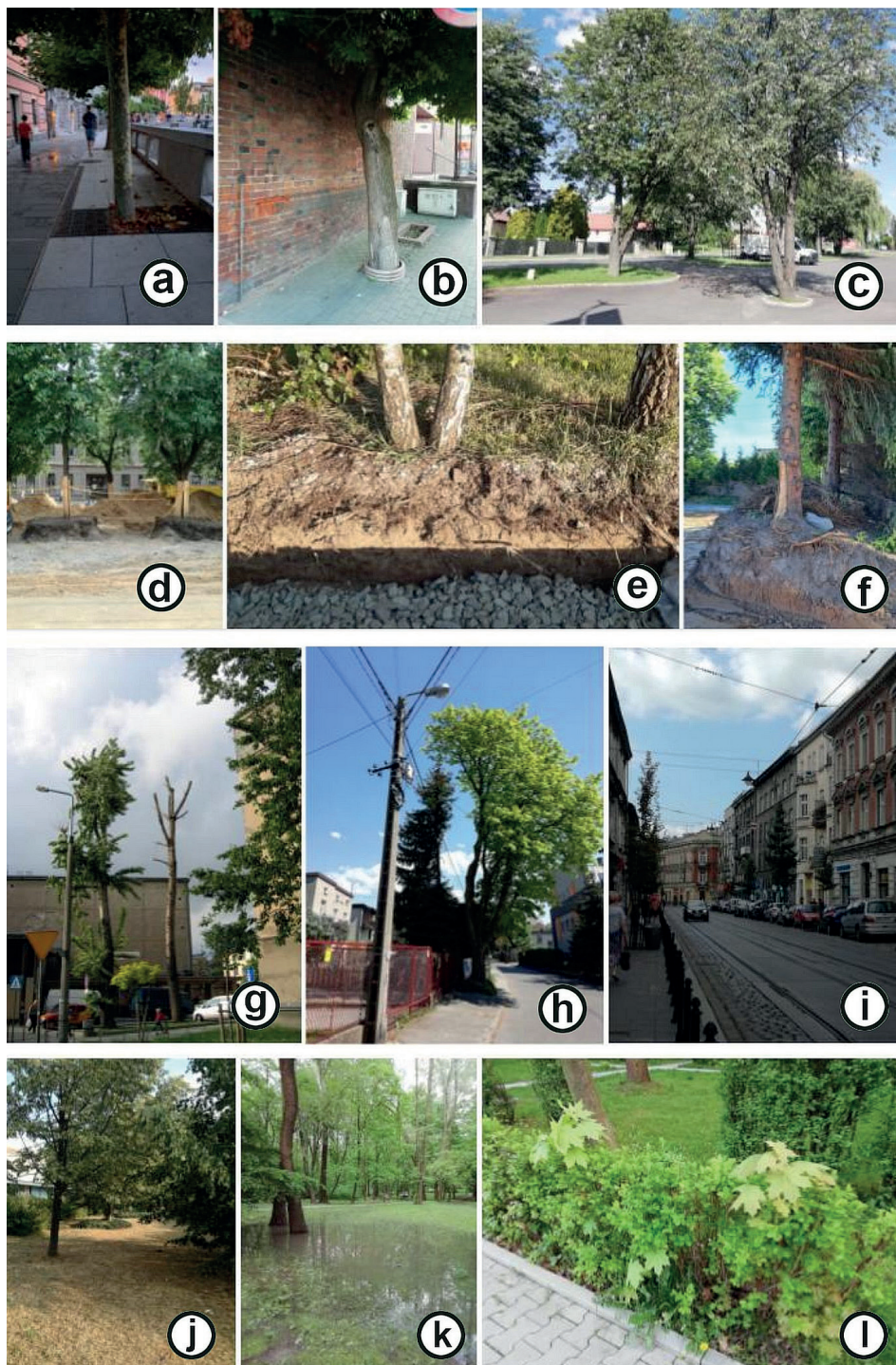
Ryc. 2. Zestawienie czynników stresowych związanych z działalnością człowieka wpływających na drzewa w mieście

oświetlenia reklam i szyldów, a nawet z niezasłoniętych okien domów, mieszkań i biur (Kuchly i in., 2012; Czaja i Kołton, 2022). Z tych wszystkich źródeł światło dociera do roślin, chcąc oświetlać inne obiekty oświetlamy nieintencjonalnie, nie celowo także korony drzew. Dlaczego stanowi to problem? Bo rośliny (drzewiaste także) posiadają rozbudowany system fotoreceptorów (Paik i Huq, 2019) wrażliwych nawet na bardzo niskie natężenia światła (jak światło księżyca) (Singiri i in., 2023; Priyanka i in., 2025), regulują one swój zegar biologiczny do aktualnej długości dnia. Co więcej, światło, a dokładnie fotoperiod (długość okresu jasnego i ciemnego w ciągu doby), stanowi ważny sygnał rozwojowy (Roeber i in., 2022; Wang i in., 2024). Problem zaburzonego fotoperiodu przez światło w nocy nie jest w pełni

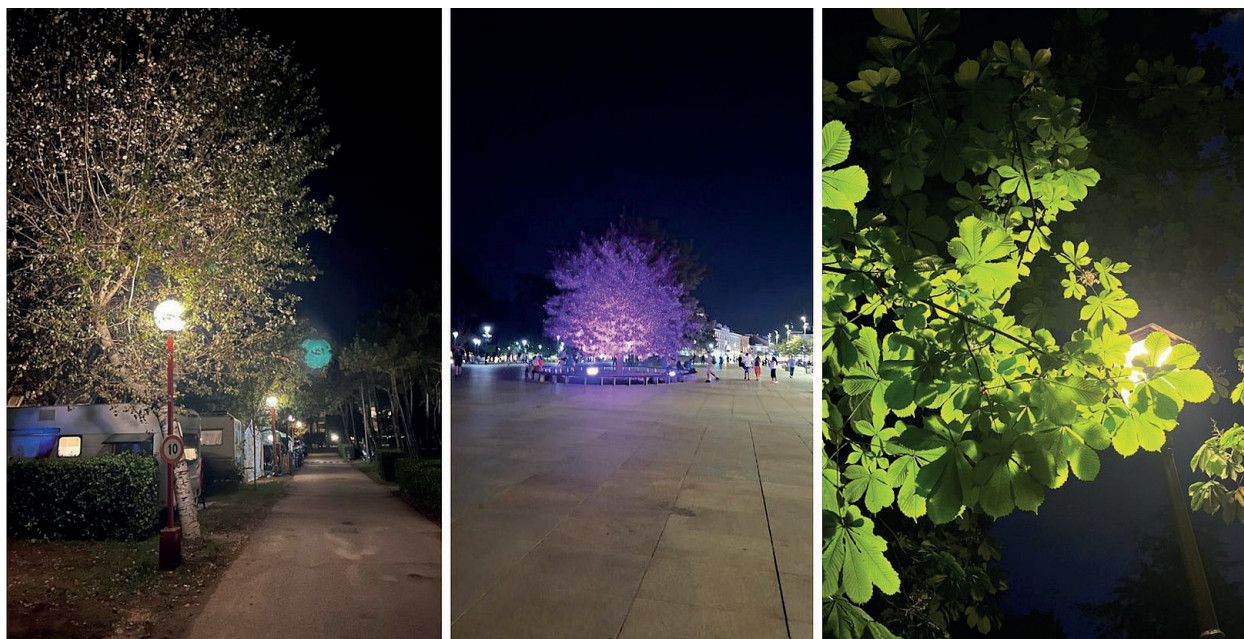
poznany u roślin, jednak poniżej przedstawiamy aktualny stan wiedzy dotyczący funkcjonowania drzew w mieście.

ZMIANY DOTYCZĄCE FENOLOGII

Fenologia odnosi się do czasu występowania powtarzających się zjawisk rozwojowych takich jak kwitnienie, owocowanie, zrzućanie liści, rozwój pąków na wiosnę czy wchodzenie w spoczynek zimowy (Katal i in., 2022). Spoczynek zimowy wyzwalany jest przez czynniki zewnętrzne takie, jak skracający się dzień i obniżająca się temperatura. Początkowo spoczynek ten związany jest z niezdolnością do wzrostu nawet przy sprzyjających warunkach zewnętrznych z powodu między innymi zmian hormonalnych czy zahamowania transportu w obrębie



Ryc. 3. Przykłady występujących w mieście czynników stresowych negatywnie wpływających na funkcjonowanie drzew. a) Ubicie podłoża wokół pnia drzew; b) Podniesie poziomu gruntów i zastosowanie nieprzepuszczalnego podłoża wokół pnia; c) Zastosowanie nieprzepuszczalnego podłoża nad systemem korzeniowym; d) Uszkodzenie systemu korzeniowego w trakcie remontu i zmiana poziomu gruntu; e) Uszkodzenie systemu korzeniowego przy budowie chodnika; f) Uszkodzenie pnia, dolnych pędów korony i systemu korzeniowego; g) Niewłaściwa pielęgnacja – zbyt intensywne cięcie; h) Konflikt z infrastrukturą – niewłaściwe planowanie; i) Zacienianie przez budynki i zastosowanie nieprzepuszczalnych nawierzchni; j) Susza; k) Podtopienia systemu korzeniowego; l) Konkurencja z innymi organizmami – siewkami – brak pielęgnacji



Ryc. 4. Lampy, które mają oświetlać drogi i chodniki, często znajdują się bezpośrednio w koronie drzew, oświetlając głównie liście zamiast infrastruktury

rośliny (Fadón i in., 2020). Ten typ spoczynku w literaturze angielskiej nazywany jest *endodormancy*, a w języku polskim nazywany jest spoczynkiem głębokim. Spoczynek ten ustępuje między innymi na skutek niskiej temperatury. Po nim następuje faza spoczynku względnego, nazywanego *ecodormancy*, który jest spowodowany niekorzystnymi czynnikami zewnętrznymi przy pełnej możliwości rośliny do wzrostu po poprawie warunków zewnętrznych (Ding i in., 2024). Czynnikami regulującymi następowanie po sobie poszczególnych faz rozwojowych w ciągu roku u drzew są długość dnia i temperatury dnia i nocy (Singh i in., 2017). W swojej pracy Singh i współautorzy (2017) prezentują roczny cykl aktywności u drzew i wnioskuje, że zarówno długość dnia (fotoperiod), jak i temperatury, a także współdziałanie tych dwóch czynników regulują wychodzenie ze spoczynku, rozwój pąków i wchodzenie w spoczynek jesienią. Zanieczyszczenie światłem może zaburzać sygnał fotoperiodyczny. Wykazano, że w miejscach silnie oświetlonych nocą rozwój pąków drzew na wiosnę był szybszy nawet o 7,5 dnia w porównaniu do miejsc ciemniejszych (Ffrench-Constant i in., 2016). Badania te prowadzono w Wielkiej Brytanii, a pod uwagę wzięto czte-

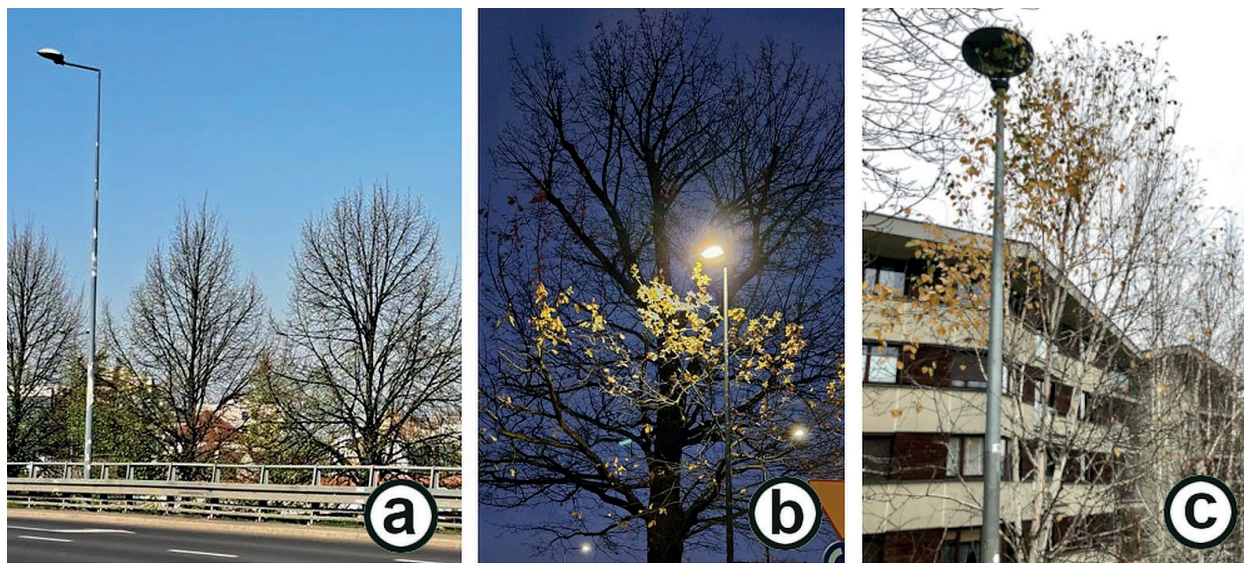
ry gatunki popularnych drzew: klon jawor (*Acer pseudoplatanus* L.), buk pospolity (*Fagus sylvatica* L.), dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.). Porównano wyniki 13 lat obserwacji fenologicznych oraz dane satelitarne o zanieczyszczeniu światłem. Uwzględniono także czynnik zmiennej temperatury. Przyspieszenie pęknięcia pąków oraz rozwoju liści (o 10 i 20 dni, odpowiednio) pod wpływem światła w nocy wykazano także u popularnych 4 gatunków drzew i 4 gatunków krzewów stosowanych w miastach: lipa srebrzysta (*Tilia tomentosa* Moench), brzoza brodawkowata (*Betula pendula* Roth.), buk pospolity (*Fagus sylvatica* L.), klon polny (*Acer campestre* L.), dereń biały (*Cornus alba* L.), suchodrzew chiński (*Lonicera pileata* Oliv), złotlin japoński (*Kerria japonica* L.) i tawuła wczesna (*Spiraea × cinerea* (Zabel) (Czaja i Kołton, 2022). Badania prowadzono na ściętych pędach przeniesionych do komór wzrostowych, gdzie kontrolowano temperaturę i poziom docierającego do roślin światła. Zastosowano dwa poziomy natężenia światła w nocy (1 i 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Również jesienne fazy rozwojowe u drzew ulegają zaburzeniu pod wpływem zanieczyszczenia światłem. Początek jesiennych faz fenologicz-

nych tzn. przebarwiania liści i opadania liści był opóźniony u drzew sumaka octowca (*Rhus typhina* L.) i klonu jawora (*Acer pseudoplatanus* L.) nawet o 22 dni w warunkach zanieczyszczenia światłem przez latarnie uliczne (natężenie promieniowania do 24 luxów) (Škvareninová i in., 2017). Autorzy podkreślają, że zmierzone promieniowanie przekraczało normy oświetleniowe obowiązujące na Słowacji nawet ponad 4 krotnie. Analiza przeprowadzona w Stanach Zjednoczonych opierająca się na bazach danych obserwacji faz fenologicznych oraz zanieczyszczenia światłem wykazała opóźnienie jesiennych faz (przebarwiania liści) średnio o 6 dni (Meng i in., 2022). Autorzy korzystali z danych pozyskanych dla lat 2011–2016. Im większe było zanieczyszczenie światłem tym znaczniejsze przesunięcie faz fenologicznych u roślin drzewiastych. Autorzy wskazują na wpływ temperatur na obserwowane zależności. Kontynuacją ich pracy było wykazanie, że światło w nocy ma większy wpływ na opóźnienie jesiennych faz fenologicznych niż podwyższona temperatura (Wang i in., 2025). Przeanalizowano dane z lat 2014–2020 dotyczące faz fenologicznych na półkuli północnej oraz dane dotyczące zanieczyszczenia światłem i temperatury. Porównywano tereny miejskie i wiejskie. Wraz ze wzrostem urbanizacji zwiększało się zanieczyszczenie światłem w nocy oraz temperatura. Jednak wpływ zanieczyszczenia światłem na fazy fenologiczne, szczególnie jesienne był większy niż temperatury. Wskazano światło w nocy jako czynnik wysoce istotny regulujący dynamikę zmian w trakcie wegetacji roślin, szczególnie w warunkach miejskich. W kontekście zanieczyszczenia światłem i jego wpływu na rośliny w literaturze można znaleźć głównie informacje dotyczące zaburzeń wiosennego rozwoju liści lub ich przebarwiania i opadania, co przedstawiamy także na Rycinie 5. Dostępne są również informacje o stopniu wrażliwości niektórych gatunków roślin drzewiastych na światło w nocy. Tu przytoczymy badania gdzie nie wykazano wpływu zanieczyszczenia światłem na opadanie liści u brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth.) (Sarala i in., 2013). Obserwacje prowadzono w Finlandii, a ilość świa-

tła emitowanego przez lampy docierająca do analizowanych liści była na poziomie $0,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. W przytoczonych badaniach rośliny były oświetlane wysoko sprawnymi lampami rtęciowymi (starego typu w porównaniu do nowoczesnych lamp LED). Wskazuje to na konieczność przeprowadzania dalszych badań i obserwacji z udziałem aktualnych źródeł światła stosowanych w technice oświetleniowej. Dla projektantów i zarządców zieleni w miastach mógłby okazać się przydatny katalog klasyfikujący rośliny drzewiaste na te bardziej i mniej wrażliwe na zanieczyszczenie światłem. Jednak przy obecnym stanie wiedzy taki podział gatunków roślin drzewiastych jest niemożliwy. Kolejną trudnością w stworzeniu takiego zestawienia roślin może stanowić hipotetyczna różna wrażliwość w różnych fazach fenologicznych. Dodatkowo brakuje danych, czy i jak zanieczyszczenie światłem wpływa na kwitnienie i owocowanie roślin drzewiastych.

ZMIANY DOTYCZĄCE BUDOWY ROŚLIN DRZEWIASTYCH

Światło jest czynnikiem wpływającym również na budowę roślin zarówno w kontekście pokroju jak i struktury poszczególnych organów. Niedobór jak i nadmiar światła w ciągu dnia powodują modyfikacje aparatu fotosyntetycznego (Roeber i in., 2021). Jak wskazują najnowsze badania, również zanieczyszczenie światłem generuje zmiany morfologii liści jak i budowy całej korony. Badania prowadzone na drzewach topoli białej (*Populus alba* L.) wykazały, że oświetlenie nocne tylko przez jeden sezon wegetacyjny może wpłynąć na architekturę korony drzew. Zaobserwowano zwiększoną długość i średnicę pędów u roślin narażonych na zanieczyszczenie światłem w porównaniu do kontroli (Lo Piccolo i in., 2024). W przytoczonym eksperymencie zastosowano oświetlenie w nocy na poziomie 300 i $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Jak wykazały badania prowadzone na liściach klonu jawora (*Acer pseudoplatanus* L.) i dławisza okrągłolistnego (*Celastrus orbiculatus* Thunb.), oświetlenie nocne może powodować zmniejszenie powierzchni blaszek liściowych przy



Ryc. 5. Najczęściej obserwowanym efektem oświetlania nocnego są zaburzenia w terminach faz rozwojowych liści. Problem dotyczy zarówno wcześniejszego rozwoju liści wiosną (a), jak i opóźnionego ich zrzucania jesienią (b i c)

równoczesnym zwiększeniu ich grubości (Kolton i in., 2022). Te wyniki były podobne zarówno dla roślin przetrzymywanych w szklarni – wyższa średnia temperatura dobową, jak i dla roślin uprawianych w warunkach zewnętrznych (niższa średnia dobową temperatura). Zmiany w budowie blaszki liściowej pod wpływem światła w nocy obserwowano także u wiaźowca zachodniego (*Celtis occidentalis* L.) (Kolman i in., 2023). Liście oświetlane lampą HPS w nocy były grubsze i miały dłuższe komórki miększu palisadowego, co wskazuje na mechanizm obronny przed nadmiarem światła. Nie wykazano tego efektu w przypadku oświetlania liści w nocy lampami LED 3000K i 2400K. Ilość światła docierająca do blaszek liściowych była na poziomie $1,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ u liści oświetlanych i $0,004 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ u nie oświetlanych lampami. Liście zbierane były z różnych stron korony tego samego drzewa od strony oświetlonej lampą i nie oświetlonej. Obserwowane są także zmiany na poziomie mniejszych struktur jak np. aparaty szparkowe roślin. Nocne oświetlanie drzew tulipanowca amerykańskiego (*Liriodendron tulipifera* L.) przez 3 lata, spowodowało różnicę także w ruchach i budowie aparatów szparkowych (Kwak i in., 2017). Rośliny traktowane światłem w nocy o natężeniu od 1 do

$50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ charakteryzowały się mniejszym otworem szparkowym oraz mniejszymi komórkami przyszparkowymi. Zaobserwowano także zmiany w budowie chloroplastów w liściach traktowanych zanieczyszczeniem światłem, między innymi dotyczące budowy błon tylakoidów gran. Te zmiany strukturalne wpływają na funkcjonowanie aparatu fotosyntetycznego.

ZMIANY DOTYCZĄCE FUNKCJONOWANIA

Wśród istotnych procesów warunkujących prawidłowe życie roślin można wymienić pobieranie i transport wody, transpirację, fotosyntezę oraz pobieranie i wykorzystanie składników mineralnych. Nie ma wystarczającej wiedzy dotyczącej tych procesów fizjologicznych u roślin traktowanych światłem w nocy. Jednocześnie znane jest oddziaływanie światła na te procesy czy to jako sygnału czy źródła energii (Bao i in., 2024). Przedstawimy tu istniejące badania związane przede wszystkim z aktywnością fotosyntetyczną. Traktowano rośliny dwóch gatunków drzew platana klonolistnego (*Platanus × hispanica* Mill. ex Münchh.) i lipy szerokolistnej (*Tilia platyphyllos* Scop.) światłem z lamp LED o natężeniu 300 i $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ w nocy, rośliny kontrolne nie były oświetlane w tej po-

rze doby (Lo Piccolo i in., 2023). Wykazano, że procesy fizjologiczne obu gatunków drzew były zmienione przez nocne oświetlenie w porównaniu do roślin kontrolnych. W szczególności zawartość chlorofili w liściach oświetlanych była wyższa niż w nieoświetlanych w nocy, jednocześnie zawartość skrobi była niższa. U roślin kontrolnych w nocy przeważało oddychanie (wydzielanie CO_2) podczas gdy u roślin oświetlanych w nocy przeważało pobieranie CO_2 co wskazuje na aktywację fotosyntezy. Ten proces mierzony w nocy u roślin traktowanych zanieczyszczeniem światłem był znacznie (około 5-krotnie) niższy niż w ciągu naturalnego dnia. W ciągu dnia wszystkie rośliny prowadziły fotosyntezę na podobnym poziomie. Warto podkreślić otwieranie aparatów szparkowych u roślin oświetlanych nocą w tej porze doby, gdy rośliny kontrolne charakteryzowały się przymkniętymi szparkami. Podobne zależności ten zespół pokazał w pracy dotyczącej topoli (Lo Piccolo i in., 2024). W nocy u roślin oświetlanych przeważała fotosynteza a u roślin kontrolnych oddychanie, jednak w ciągu dnia fotosynteza była znacznie intensywniejsza. W przypadku topoli oświetlanie w nocy światłem na poziomie $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obniżało fotosyntezę w ciągu dnia. Autorzy tych opracowań podkreślają, że poziom światła w nocy zastosowany w eksperymentach był podobny do obserwowanych realnych wartości w miastach. Jednak w porównaniu do innych opracowań był znacznie wyższy. Dla porównania w opracowaniu Wei i współautorów (2023) zastosowano poziom światła w nocy około $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. W przytoczonej pracy rośliny dwóch popularnych gatunków krzewów: trzmieliny japońskiej (*Euonymus japonicus* Thunb.) i róży wielkokwiatowej (*Rosa hybrida* L.) traktowano światłem o różnej barwie (zielone, czerwone, niebieskie i białe 6500K) w nocy i porównywano ich aktywność fotosyntetyczną do roślin nie oświetlanych w nocy. Zawartość chlorofili, karotenoidów oraz intensywność fotosyntezy w liściach tych krzewów była mniejsza po zastosowaniu promieniowania czerwonego lub niebieskiego w porównaniu do roślin kontrolnych. Nie wykazano wpływu różnego typu promieniowania w nocy

na otwieranie aparatów szparkowych tych roślin drzewiastych. Porównywano intensywność fotosyntezy u wiązowca zachodniego (*Celtis occidentalis* L.) w koronie drzewa po stronie oświetlonej i nie oświetlonej lampą (Kolman i in., 2023). Oświetlanie lampą HPS zwiększyło intensywność fotosyntezy i transpiracji liści w porównaniu do liści nie oświetlonych. Natomiast oświetlenie lampą emitującą światło białe (3000K) zwiększyło intensywność fotosyntezy a obniżyło intensywność transpiracji. Co ciekawe, zastosowanie lampy białej 2400K obniżyło intensywność obu procesów. Jak widać trudno wyciągnąć jednoznaczne wnioski gdy dostępne badania są prowadzone w tak różnych warunkach. Reakcja roślin będzie zależna od gatunku, intensywności zastosowanego światła w nocy oraz jego jakości (składu spektralnego). Wpływ składu spektralnego na funkcjonowanie siewek drzew potwierdzają badania Liu i współautorów (2021). Siewki traktowano w nocy światłem czerwono – niebieskim lub białym. Siewki kontrolne były nie oświetlane. Testowano dwa gatunki drzew: klon ściętolistny (*Acer truncatum* Bunge) i dąb mongolski (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.). U klonu lepsze gromadzenie azotu obserwowano pod wpływem światła czerwono-niebieskiego, u dębu pod wpływem światła białego w nocy. Rodzaj światła w nocy zmieniał też gromadzenie wody w tkankach obu gatunków. Choć Autorzy podkreślają, że generalnie zaburzenie fotoperiodu (oświetlanie w nocy) miało większy wpływ na badane drzewa niż rodzaj zastosowanego światła w nocy.

PODSUMOWANIE I PERSPEKTYWY DALSZEGO ROZWOJU BADAŃ

Na skutek aktywności człowieka zanieczyszczenie światłem wciąż rośnie (Sánchez de Miguel i in., 2021) jest to związane zarówno z większą liczbą źródeł światła jak i zmianami oświetlenia starego typu (HPS) na oświetlenie typu LED. Zmienia się nie tylko natężenie promieniowania emitowanego do środowiska, ale także skład spektralny tego światła. Wraz z rosnącym użyciem oświetlenia LED (szczególnie popularnego światła białego zimnego) rośnie

ilość promieniowania niebieskiego, które najłatwiej przemieszcza się w środowisku i powoduje wzrost zanieczyszczenia światłem. Warto tu wspomnieć, że promieniowanie białe bogate w fale niebieskie nocą rozregulowuje funkcjonowanie roślin, ale także bardzo mocno negatywnie wpływa na ludzi i zwierzęta.

Czy możemy coś zrobić myśląc o ochronie drzew w mieście i stymulacji ich wzrostu i rozwoju? Tak. Wprowadzamy elementy racjonalnej polityki oświetleniowej. Pamiętajmy, aby oświetlać tylko te elementy, które są konieczne: drogi, chodniki, podejścia do budynków, przejścia dla pieszych. Oświetlajmy tylko wtedy, kiedy jest to konieczne i kiedy światło jest używane – jeśli główna ścieżka w parku jest oświetlona a park jest zamykany na noc to można takie źródła światła wyłączyć. Jeśli niektóre ścieżki, przejścia na osiedlach, mniej uczęszczanych miejscach nie mają wielu użytkowników w nocy to można wyłączyć lub przyciemnić takie oświetlenie albo wprowadzić czujniki ruchu, które wywołą włączenie oświetlenia gdy pojawi się człowiek. Nie oświetlajmy i nie podświetlajmy drzew i krzewów. Jeśli chcemy wprowadzić oświetlenie dekoracyjne np. świąteczne, korzystajmy z niego tylko w krótkim okresie, wyłączajmy te światła w nocy. Z jednej strony pozwoli to poprawić funkcjonowanie i zapewnić długowieczność drzew, z drugiej strony pamiętajmy, że drzewa są siedliskiem dla wielu organizmów: ptaków, drobnych ssaków czy owadów. Zapewniając ciemną przestrzeń w obrębie korony drzew umożliwiamy tym organizmom prawidłowy rozwój. Można wprowadzać w parkach, terenach zieleni publicznej czy ogrodach strefy ciemne zupełnie pozbawione światła w nocy aby umożliwić przemieszczanie się zwierząt nocnych i tworzenie korytarzy życia dla nich. Planujmy rozsądnie – należy zapewnić odpowiednią odległość lamp od koron drzew, w trakcie nasadzeń i projektowania pamiętajmy że drzewa rosną i uwzględniamy docelową wielkość korony danego gatunku. Stosujmy źródła światła o ciepłej temperaturze barwowej (poniżej 3000K) lub zmianę składu spektralnego w godzinach nocnych (np. po 23:00). Za każdym razem zastanówmy się, ile nas będzie

kosztować stosowanie danego punktu oświetleniowego (uwzględniając koszt energii elektrycznej jak i koszty środowiskowe) i czy jest to konieczne przez całą noc.

Na koniec należy wspomnieć o nieoczywistym podejściu do drzew. Jeśli ich ochrona nie jest priorytetem, możemy stosować szpalery z drzew i krzewów jako bariery chroniące przed światłem w nocy okna mieszkań. Ochrona starych drzew przed wycinką skutkowałą zmniejszeniem zanieczyszczenia światłem mierzonego przez satelity – czyli im większe były korony drzew tym lepiej osłaniały emitowane światło i nie pozwalały na jego ucieczkę w górę do czujników satelity (Sung i Kim, 2025). Wykazano, że drzewa zmniejszają zanieczyszczenie światłem (stanowią bariery) co umożliwia lepsze bytowanie nietoperzy unikających światła w nocy (Straka i in., 2019).

Podsumowując:

- Ucieczka światła stanowi zagrożenie dla środowiska – **zanieczyszczenie światłem**
- Problem ten jest efektem działalności człowieka i zwiększa się z każdym rokiem
- Nie są znane wszystkie efekty/skutki zanieczyszczenia światłem dla roślin drzewiastych
- Zanieczyszczenie światłem to tylko **jeden z wielu** czynników stresowych pogarszających funkcjonowanie roślin drzewiastych w miastach

OŚWIADCZENIA AUTORÓW

Wszyscy autorzy deklarują wkład w powstawanie artykułu, zaakceptowali kolejność autorów i ostateczną wersję artykułu.

Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

BIBLIOGRAFIA

- Bao, Y., Liu, X., Feng, C.H., Niu, M.X., Liu, C., i in., 2024. Light and light signals regulate growth and development in woody plants. *Forests*, 15(3), 523. <https://doi.org/10.3390/f15030523>
- Chakravarty, S., Pala, N.A., Tamang, B., Sarkar, B.C., Manohar, K.A., i in., 2019. Eco-

- system Services of Trees Outside Forest, w: Jhariya, M., Banerjee, A., Meena, R., Yadav, D. (Red.), Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6830-1_10
- Czaja, M., Kolton, A., 2022. How light pollution can affect spring development of urban trees and shrubs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 77, 127753. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127753>
- Czaja, M., Kolton, A., Muras, P., 2020. The complex issue of urban trees—Stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests*, 11(9), 932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>
- Ding, J., Wang, K., Pandey, S., Perales, M., Allona, I., i in., 2024. Molecular advances in bud dormancy in trees. *Journal of Experimental Botany*, 75(19), 6063–6075. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae183>
- Drew-Smythe, J.J., Davila, Y.C., McLean, C.M., Hingee, M.C., Murray, M.L., i in., 2023. Community perceptions of ecosystem services and disservices linked to urban tree plantings. *Urban Forestry & Urban Greening*, 82, 127870. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127870>
- Erdős, L., Bede-Fazekas, Á., Bátori, Z., Berg, C., Kröel-Dulay, G., i in., 2022. Species-based indicators to assess habitat degradation: Comparing the conceptual, methodological, and ecological relationships between hemeroby and naturalness values. *Ecological Indicators*, 136, 108707. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108707>
- Fadón, E., Fernandez, E., Behn, H., Luedeling, E., 2020. A conceptual framework for winter dormancy in deciduous trees. *Agronomy*, 10(2), 241. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020241>
- French-Constant, R.H., Somers-Yeates, R., Bennie, J., Economou, T., Hodgson, D., i in., 2016. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1833), 20160813. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>
- Forrest, M., Konijnendijk, C. A History of Urban Forests and Trees in Europe, w: Urban Forests and Trees; Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T., Schipperijn, J. (Red.), Springer: Berlin, Germany, 2005; s. 23–48.
- GIOŚ CORINE Land Cover – CLC, 2025. <https://clc.gios.gov.pl/index.php/o-clc/legenda>. (dostęp 12 listopada 2025)
- Green, R.F., Luginbuhl, C.B., Wainscoat, R.J., Duriscoe, D., 2022. The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 30(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s00159-021-00138-3>
- Hill, M.O., Roy, D.B., Thompson, K., 2002. Hemeroby, urbanity and ruderality: bioindicators of disturbance and human impact. *Journal of Applied Ecology*, 39(5), 708–720. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00746.x>
- Hiura, T., Okada, H., Terada, C., Nakamura, M., Kaneko, N., 2024. Effects of soil compaction on above-and belowground interactions during the early stage of forest development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 102, 128565. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128565>
- IUCN, 2024. <https://iucn.org/resources/issues-brief/light-pollution> (dostęp 19 września 2025)
- Jasinačiūtė, A., Veteikis, D., 2022. Assessing landscape instability through land-cover change based on the hemeroby index (Lithuanian example). *Land*, 11(7), 1056. <https://doi.org/10.3390/land11071056>
- Katal, N., Rzanny, M., Mäder, P., Wäldchen, J., 2022. Deep learning in plant phenological research: A systematic literature review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 805738. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.805738>
- Kolman, F., Dani, M., Molnár, P., Skribanek, A., 2023. The effect of three types of street lighting on the morphology and physiology of the common hackberry (*Celtis occidentalis* L.) leaves. *Botany Letters*, 170(4), 600–611. <https://doi.org/10.1080/23818107.2023.2211647>
- Kolton, A., Wojciechowska, R., Czaja, M., 2022. Modyfikacja budowy morfologicznej liści klonu jawora i dławisza okrągłolistnego na skutek zanieczyszczenia światłem nocą, w: Tabaka, P., (Red.), Sztuczne światło nocą

- między zagrożeniem a rozwojem, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, s. 19–33. <https://doi.org/10.34658/9788366741461>
- Kuechly, H.U., Kyba, C.C., Ruhtz, T., Lindemann, C., Wolter, C., i in., 2012. Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 126, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.008>
- Kwak, M.J., Lee, S.H., Khaine, I., Je, S.M., Lee, T.Y., i in., 2017. Stomatal movements depend on interactions between external night light cue and internal signals activated by rhythmic starch turnover and abscisic acid (ABA) levels at dawn and dusk. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(8), 162. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2465-y>
- Liu, P., Cao, B., Wang, Y., Wei, Z., Ye, J., i in., 2021. Spectral effect of streetlamps on urban trees: A simulated study on tissue water, nitrogen, and carbohydrate contents in maple and oak. *PLoS ONE* 16(3): e0248463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248463>
- Livesley, S.J., McPherson, E.G., Calfapietra, C., 2016. The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of environmental quality*, 45(1), 119–124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Lo Piccolo, E.L., Torre, S., Lauria, G., De Quattro, C., Sebastiani, F., i in., 2024. LED streetlamps alter tree architecture, downregulate the photosynthetic process and alter the sugar metabolism of *Populus alba* L. *Environmental and Experimental Botany*, 226, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105861>
- Lo Piccolo, E., Lauria, G., Guidi, L., Remorini, D., Massai, R., i in., 2023. Shedding light on the effects of LED streetlamps on trees in urban areas: Friends or foes?. *Science of the Total Environment*, 865, 161200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161200>
- Lüttge, U., Buckeridge, M., 2023. Trees: structure and function and the challenges of urbanization. *Trees*, 37(1), 9–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01964-1>
- Mao, Q., Huang, G., Buyantuev, A., Wu, J., Luo, S., i in., 2014. Spatial heterogeneity of urban soils: the case of the Beijing metropolitan region, China. *Ecological Processes*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13717-014-0023-8>
- Meng, L., Zhou, Y., Román, M.O., Stokes, E.C., Wang, Z., i in., 2022. Artificial light at night: an underappreciated effect on phenology of deciduous woody plants. *PNAS nexus*, 1(2), pgac046. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac046>
- Natural History Museum, 2025. <https://www.nhm.ac.uk/discover/light-pollution.html> (dostęp 19 września 2025)
- Paik, I., Huq, E., 2019. Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks, w: *Seminars in cell & developmental biology* (Vol. 92, s. 114–121). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>
- Phillips, B.B., Bullock, J.M., Osborne, J.L., Gaston, K.J., 2021. Spatial extent of road pollution: A national analysis. *Science of the Total Environment*, 773, 145589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145589>
- Priyanka, G., Singiri, J.R., Novoplansky, N., Grafi, G., 2025. Short Exposure to Full Moonlight Has a Long-Term Impact on *Brassica juncea* Cell Activity and Growth. *Plant, Cell & Environment*, 48(5), 3038–3051. <https://doi.org/10.1111/pce.15333>
- Przeździecki, K., Zawadzki, J., 2023. Impact of the variability of vegetation, soil moisture, and building density between city districts on land surface temperature, Warsaw, Poland. *Sustainability*, 15(2), 1274. <https://doi.org/10.3390/su15021274>
- Roeber, V.M., Bajaj, I., Rohde, M., Schmölling, T., Cortleven, A., 2021. Light acts as a stressor and influences abiotic and biotic stress responses in plants. *Plant, Cell & Environment*, 44(3), 645–664. <https://doi.org/10.1111/pce.13948>
- Roeber, V.M., Schmölling, T., Cortleven, A., 2022. The photoperiod: handling and causing stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 781988. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.781988>

- Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M.A., Grote, R., Pauleit, S., i in., 2020. Modelling urban tree growth and ecosystem services: Review and perspectives. *Progress in Botany* Vol. 82, 405–464.
- Sæbø, A., Borzan, Ž., Ducatillion, C., Hatzistathis, A., Lagerström, T., i in., 2005. The selection of plant materials for street trees, park trees and urban woodland, w: *Urban Forests and Trees*; Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T., Schipperijn, J. (Red.), Springer: Berlin, Germany, s. 257–280.
- Salmond, J.A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., i in., 2016. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental health*, 15(Suppl 1), S36. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>
- Sánchez de Miguel, A., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S., Gaston, K.J., 2021. First estimation of global trends in nocturnal power emissions reveals acceleration of light pollution. *Remote Sensing*, 13(16), 3311. <https://doi.org/10.3390/rs13163311>
- Šantrůčková, M., Demková, K., Frantík, T., Dostálek, J., 2025. Indices of human impacts on landscapes: How do they reflect the proportions of natural habitats?. *Open Life Sciences*, 20(1), 20251085. <https://doi.org/10.1515/biol-2025-1085>
- Sarala, M., Tahkokorpi, M., Niinimaa, A., Laine, K., Taulavuori, E., i in., 2013. Street lamp light does not delay autumnal leaf colouration of *Betula pendula*. *Trees*, 27, 1193–1199. DOI 10.1007/s00468-013-0841-9
- Singh, R.K., Svystun, T., AlDahmash, B., Jönsson, A.M., Bhalerao, R.P., 2017. Photoperiod-and temperature-mediated control of phenology in trees—a molecular perspective. *New Phytologist*, 213(2), 511–524. <https://doi.org/10.1111/nph.14346>
- Singiri, J.R., Priyanka, G., Trishla, V.S., Adler-Agmon, Z., Grafi, G., 2023. Moonlight is perceived as a signal promoting genome reorganization, changes in protein and metabolite profiles and plant growth. *Plants*, 12(5), 1121. <https://doi.org/10.3390/plants12051121>
- Škvareninová, J., Tuhárska, M., Škvarenina, J., Babálová, D., Slobodníková, L., i in., 2017. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian geographical reports*, 25(4), 282–290. doi: 10.1515/mgr-2017-0024
- Smith, K.T., Lopez, B., Vignieri, S., Wible, B., 2023. Losing the darkness. *Science*, 380(6650), 1116–1117. <https://doi.org/10.1126/science.adi4552>
- Steinhardt, U., Herzog, F., Lausch, A., Müller, E., Lehmann, S., 1999. Hemeroby index for landscape monitoring and evaluation, w: Pykh, Y.A., Hyatt, D.E., Lenz, R.J. (Red.): *Environmental Indices – System Analysis Approach*. Oxford, EOLSS Publ., s. 237–254
- Straka, T.M., Wolf, M., Gras, P., Buchholz, S., Voigt, C.C., 2019. Tree cover mediates the effect of artificial light on urban bats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 91. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00091>
- Sung, C.Y., Kim, Y.J., 2025. Tree removal regulation mitigates light pollution in suburban communities. *Journal of Environmental Planning and Management*, 68(10), 2479–2493. <https://doi.org/10.1080/09640568.2024.2317891>
- Tan, X., Shibata, S., 2022. Factors influencing street tree health in constrained planting spaces: Evidence from Kyoto City, Japan. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127416. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127416>
- Tudge, C., 2006. *The tree: A natural history of what trees are, how they live, and why they matter*. Crown.
- Tzavali, A., Paravantis, J.P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A., Stigka, E., 2015. Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(12b), 4537–4554.
- Wang, F., Han, T., Jeffrey Chen, Z., 2024. Circadian and photoperiodic regulation of the vegetative to reproductive transition in plants. *Communications biology*, 7(1), 579. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06275-6>
- Wang, L., Meng, L., Richardson, A.D., Hölker, F., Li, H., i in., 2025. Artificial light at night outweighs temperature in lengthening ur-

- ban growing seasons. *Nature Cities*, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s44284-025-00258-2>
- Wei, Y., Li, Z., Zhang, J., Hu, D., 2023. Influence of night-time light pollution on the photosynthesis and physiological characteristics of the urban plants *Euonymus japonicus* and *Rosa hybrida*. *Ecological Processes*, 12(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00449-6>
- Wilkaniec, A., Borowiak-Sobkowiak, B., Irzykowska, L., Breś, W., Świerk, D., i in., 2021. Biotic and abiotic factors causing the collapse of *Robinia pseudoacacia* L. veteran trees in urban environments. *PLoS One*, 16(1), e0245398. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245398>
- Zhu, J., Cao, Y., He, W., Xu, Q., Xu, C., i in., 2021. Leaf functional traits differentiation in relation to covering materials of urban tree pits. *BMC Plant Biology*, 21(1), 556. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03316-8>

