

О. Г. Луцишин, І. К. Тесленко, В. В. Биков

Стратегія виживання деревних рослин тополі пірамідальної (*Populus pyramidalis* Roz.) в умовах урботехногенного забруднення

(Представлено академіком НАН України Д. М. Гродзинським)

Переважаюча локалізація іонів Na^+ у кореневій системі тополі пірамідальної визначає направленість адаптивних змін та стратегію виживання виду в умовах техноурбоєда-фотопів мегаполісу. Накопичення Na^+ у кореневій системі прискорює формування суховершинності дерев, у процесі якого активізуються бокові сплячі бруньки, пагони яких володіють додатковою стійкістю порівняно з материнським організмом, що сприяє відновленню функціонального стану рослин з високим ступенем реалізації адаптивного потенціалу морфологічних ознак на рівні онтогенетичної (80,9–91,2%) та філогенетичної (77,4–92,3%) адаптацій.

Вид тополі пірамідальної є одним з найбільш поширених у вуличних насадженнях м. Київ, де її питома вага становить 20,8% загальної кількості деревних видів [1]. За науково-літературними даними, фітомаса тополі пірамідальної здатна біоакумулювати максимальний спектр важких металів вище гранично допустимих концентрацій (ГДК), при цьому автори відзначають високу стійкість ростових процесів навіть при рівнях забруднення >100 ГДК [2]. Так, згідно з експериментальними даними, тополя пірамідальна характеризується високою газо-, соле-, зимостійкістю, що свідчить про її підвищену екологічну пластичність, та володіє високою толерантністю до зміни умов навколишнього середовища [3]. При цьому вуличні насадження тополі пірамідальної своїм листяним покривом поглинають шкідливі промислові та автотранспортні викиди, осаджують сажу і пил на поверхні листків крони, отже, тополя має потужну очисну функцію в урботехногенному доквіллі, тому деревні рослини тополі використовують як біоіндикаторні тест-системи при моніторингу техногенного забруднення навколишнього середовища [4].

При техногенному забрудненні доквілля Київського мегаполісу, де концентраційні рівні фітотоксикантів (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}) є кризовими, вид тополі пірамідальної володіє рядом пристосувально-захисних механізмів виживання в цих екстремальних умовах [5, 6].

Екомоніторинг ґрунтів та функціонального стану деревних рослин проводився на модельних ділянках по вул. акад. Лебедева, як зеленої зони, що зазнала мінімального впливу техногенного забруднення, а також у вуличних насадженнях вздовж автотранспортної магістралі по просп. Возз'єднання, едафотопи яких знаходяться під впливом хронічного пролонгованого антропогенного й техногенного навантаження.

Об'єктом дослідження обрані деревні рослини виду тополі пірамідальної (*Populus pyramidalis* Roz.), де контрольним тест-об'єктом є дерева модельної ділянки по вул. акад. Лебедева.

На підставі аналізу наукових даних і результатів наших досліджень можна припустити, що до найнебезпечніших чинників, які згубно впливають на вуличні деревні насадження, належать надмірні концентрації фітотоксичних елементів Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} [5–8].

© О. Г. Луцишин, І. К. Тесленко, В. В. Биков, 2014

Основним джерелом іонів Na^+ , Cl^- є неконтрольоване та не виправдане внесення в довкілля міста високих концентрацій технічної солі NaCl , як засіб боротьби проти ожеледиці в зимовий період, де іони Na^+ (рухома форма) при кризових концентраціях у ґрунті й фітомасі дерев (коріння, листки, кора) виявились агресивними фітотоксикантами і основними чинниками некротизації листяного покриву крони та дефоліації дерев чутливих видів (липи серцелистої, клена гостролистого, гіркокаштану звичайного) у літній період [9].

До основних джерел іонів Pb^{2+} й Cd^{2+} належать автотранспортні викиди (>90% загального техногенного забруднення), де кількість автотранспортних одиниць більше 1 млн, і невпинно зростає, що супроводжується таким самим невпинним зростанням концентрацій даних іонів і вже на сьогодні перевищує ГДК від 30,0 до 51,3 у ґрунті в зоні кореневої системи дерев.

При дослідженні рівнів забруднення ґрунту в зоні кореневої системи та фітомаси деревних рослин тополі пірамідальної фітотоксичними елементами виявлено, що при високому значенні коефіцієнта концентрації іонів Na^+ у ґрунті (K_e 15,7) величина коефіцієнта накопичення (K_n) залежить від біоаккумулятивної та локалізаційної здатності різних органів і тканин рослин. Найвищою здатністю накопичувати та локалізувати Na^+ володіє коренева система тополі пірамідальної (K_n 5,2), найнижчою — фотосинтезуючі органи рослин (K_n 1,56), де коефіцієнт концентрації елементів (K_e) у ґрунті в зоні кореневої системи є відношення концентрації елементів у ґрунті вуличних насаджень до їх вмісту в контрольних тест-об'єктах та коефіцієнт накопичення фітотоксикантів — відношення вмісту елементів у листках, корінні, корі у вуличних насадженнях дерев до їх вмісту в контрольних тест-об'єктах (рис 1, а).

Переважає накопичення іонів Na^+ у кореневій системі визначає стратегію адаптивних змін морфологічних ознак та ступінь стійкості асиміляційної системи тополі пірамідальної. Подібної закономірності не спостерігається при біоаккумуляції іонів Cl^- у фітомасі дерев. Незалежно від високих рівнів забруднення ґрунту іонами Cl^- , накопичення елемента в листках і корі практично знаходиться на рівні контрольного тест-об'єкта, накопичення Cl^- у корінні в 3,7 рази нижча, ніж Na^+ .

При незначному перевищенні рівня забруднення Cd^{2+} у ґрунті вуличних насаджень відносно контрольної зони (K_e 1,76) накопичення кадмію у корінні, листках, корі знаходиться практично на рівні тест-контролю (відповідно K_n — 1,08; 1,02; 1,01).

Концентрація Pb^{2+} у ґрунті в зоні кореневої системи тополі пірамідальної (залежно від розташування вздовж автотраси) коливається від 26,0 до 55,2 ГДК. Біоаккумуляція та локалізація іонів Pb^{2+} залежить від їх концентрації у ґрунті. При високій концентрації Pb^{2+} у ґрунті (K_e 7,79) фітотоксикант переважно локалізується у корінні (K_n 2,02) з найнижчою локалізацією в листках (K_n 1,09).

При цьому екологічна пластичність рівнів біоаккумуляції різних фітотоксичних елементів у фітомасі дерев залежить від концентрації елементів у ґрунті (див. рис. 1, а). Екологічну пластичність визначали як відсоток максимальних рівнів біоаккумуляції елементів у фітомасі дерев (коріння, листки, кора) від мінімальних рівнів, де мінімальні величини мінливості вмісту елементів у фітомасі є показниками стійкості рослин до цих рівнів накопичення, відповідно максимальні значення визначають рівень пристосування рослинних організмів при дії стресових факторів, до яких відносяться фітотоксичні елементи [10].

Для іонів Pb^{2+} при порівняно низьких концентраціях елемента в ґрунті в зоні кореневої системи дерев (min — 6,9 мг/кг; max — 12,4 мг/кг) екологічна пластичність зростає відповідно у корінні — 325,7%, листках — 226,7%; корі — 218,0%. При зростанні рівня за-

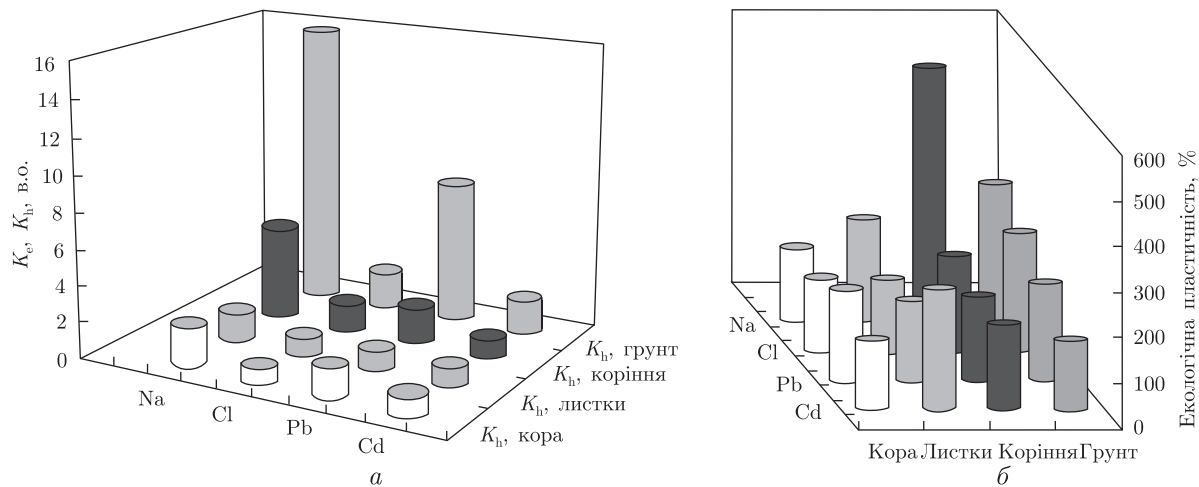


Рис. 1. Біоаккумуляція фітотоксичних елементів (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}) та їх екологічна пластичність у ґрунті й фітомасі рослин тополі пірамідальної:

a — коефіцієнт концентрації елементів у ґрунті (K_c), коефіцієнт накопичення елементів у фітомасі (K_p) деревних рослин тополі пірамідальної; *б* — екологічна пластичність біоаккумуляції фітотоксичних елементів у ґрунті в зоні кореневої системи дерев та фітомасі рослин

бруднення іонами Pb^{2+} у техногенній зоні по просп. Возз'єднання (min — 58,1 мг/кг; max — 110,5 мг/кг) екологічна пластичність знижується відповідно у корінні до 183,4%; листках — 173,6%, корі — 198,1%, що характеризує достатньо високу ефективність пристосувально-захисних механізмів виду до токсичної дії іонів Pb^{2+} .

Протилежна закономірність виявлена для іонів Na^+ . Так, при низьких рівнях забруднення іонами Na^+ у ґрунті в зоні кореневої системи тополі (min — 17,3 мг/кг; max — 26,0 мг/кг) екологічна пластичність показника біоаккумуляції Na^+ у фітомасі дерев виявилась низькою відповідно у корінні — 170,4%; листках — 132,3%; корі — 178,8%, що визначає стійкість тополі до низьких концентрацій іонів Na^+ .

При накопиченні високих концентрацій іонів Na^+ у ґрунті в зоні техногенного забруднення (min — 156,2 мг/кг; max — 468,3 мг/кг) екологічна пластичність величин біоаккумуляції у корінні різко зростає (558,7%), що втричі вище від низьких рівнів і більше, ніж удвічі (2,5 раза) відносно листків, отже, рівень біоаккумуляції елемента натрію в кореневій системі визначає адаптивну направленість змін морфофізіологічних ознак і стратегію виживання рослин.

Такої чіткої закономірності не виявлено для іонів Cl^- й Cd^{2+} . При забрудненні ґрунту іонами Cl^- у зоні кореневої системи тополі в умовах техноурбанізованого довкілля екологічна пластичність незначно зростає тільки в корінні, отже, листки і кора є більш стійкими до дії іонів Cl^- . Низькою екологічною пластичністю також характеризується біоаккумуляція іонів Cd^{2+} з низьким коефіцієнтом накопичення у фітомасі рослин.

Переважає локалізація найбільш агресивних фітотоксичних елементів Na^+ й Pb^{2+} у кореневій системі тополі пірамідальної в науковій літературі розглядається як еволюційно-пристосувальний процес захисту фотосинтезуючих органів рослин від надмірного нагромадження цих високотоксичних елементів, що підвищує стійкість асиміляційної системи тополі та в умовах техногенно урбанізованого довкілля сприяє виживанню виду [11]. За науково-літературними даними, рослини, які стійкі до дії Na^+ , володіють здатністю стримувати надходження цих іонів у фотосинтезуючі органи, де токсичність іонів Na^+ у ко-

ренивій системі рослин різко знижується (K_T 0,5), що у 5,2 раза нижче, ніж токсичність Na^+ у листках (K_T 2,7) [7, 12]. У рослин тополі пірамідальної при відносно високому накопиченні в листках фітотоксичних елементів повністю відсутній крайовий і міжжилковий некроз. Виявлений точковий некроз (2–4 точки на листову пластинку у 34% уражених листків) є настільки слабким, що практично не може впливати на функціональний стан рослин. Кількість листків уражених хлорозом становить 1,8% листового покриву крони, що свідчить про стійкість асиміляційної системи тополі пірамідальної. Проте у 71,4% досліджених дерев спостерігалась суховершинність та засихання окремих гілок з ураженням крони від 20,0 до 71,0%.

Основною причиною суховершинності при високих рівнях концентрації Na^+ (520 мг/100 г) й Pb^{2+} (10 мг/кг) є розвиток кореневої недостатності, порушення корелятивного коренево-листового функціонального взаємозв'язку, що зв'язано з пригніченням функціонування кореневої системи, яка не забезпечує наземну частину дерев речовинами живлення і води та метаболітами, які синтезуються в кореневій системі (амінокислоти, білки, фосфорні сполуки, необхідні групи фітогормонів, ферментів тощо) [13]. Техногенне забруднення ґрунту, особливо іонами Na^+ і важкими металами (Pb^{2+}), гальмують ріст головного кореня внаслідок порушення структури й метаболізму клітин, що спричиняє зміну форми кореневої системи [11, 14].

Крім того, на розвиток кореневої недостатності тополі пірамідальної впливають едафічні показники ґрунту міських техноурбоекосистем (дефіцит вологості, мінерального живлення, гумусу, органічного азоту, Mg^{2+}), що за нормативними оцінками вдвічі-тричі нижче оптимального рівня. При цьому високі концентрації іонів Na^+ змінюють кислотність ґрунтового розчину до лужної реакції (рН_c від 7,20 до 7,86), що не сприяє нормальному росту і розвитку кореневої системи. При цьому іони Na^+ у кореневій системі підсилюють водний дефіцит рослин, що знижує доступність води рослинам, тобто засоленість за характером дії еквівалентна висушуванню ґрунту. В умовах Київського мегаполісу, де вологість ґрунту низька (9,7% від оптимального) і концентрація Na^+ у корінні надмірна (0,520%), спостерігається високий рівень суховершинності дерев (у 5,0 раза вище природної зони).

Отже, переважне накопичення іонів Na^+ й Pb^{2+} у кореневій системі та часткове відмирання верхівок дерева науковцями розглядається як адаптивна реакція, яка направлена на оптимізацію функціонального стану рослин в умовах техногенного забруднення довкілля та є пристосувально-захисним механізмом і визначає стратегію виживання виду в екстремальних умовах техноурбанізованого довкілля.

При цьому формування суховершинності дерев активізує бокові сплячі бруньки, пагони яких володіють додатковою стійкістю порівняно з материнським організмом [13]. Внаслідок проростання сплячих бруньок рослинний організм здатний до відновлення крони, що особливо проявляється при проведенні кронування дерев. Подібну стратегію виживання можна розглядати як вияв здатності тополі пірамідальної адаптуватись до зростання техногенного забруднення фітотоксичними елементами у довкіллі мегаполісу.

Основними фітоіндикаторними маркерами функціонального стану деревних рослин є морфологічні ознаки: річний приріст дерев за довжиною однорічних пагонів (I і II порядку), кількість листків на пагонах, площа, довжина, ширина та індекс форми листків, накопичення сухої біомаси у листках, рівень вологості у листках, інтенсивність фотосинтетичних процесів за індексом індукції (F_m/F_s) флуоресценції хлорофіла у листках.

Ступінь пригнічення функціонального стану за фітоіндикаторними параметрами тополі пірамідальної без кронування дерев проявився незначними змінами морфологічних

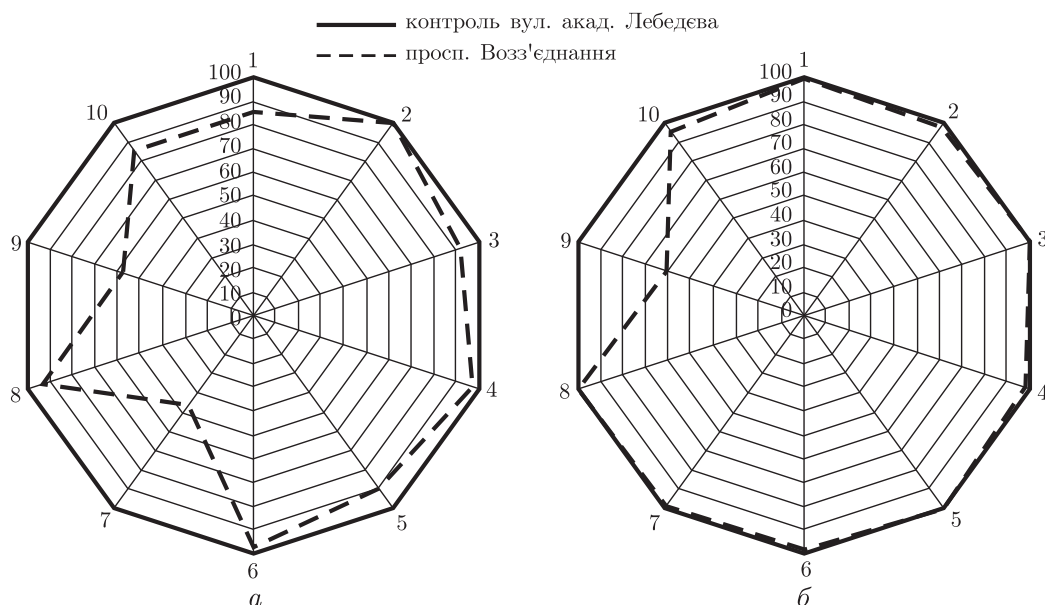


Рис. 2. Комплексна оцінка морфофізіологічних параметрів ростових процесів в умовах техногенного забруднення м. Київ (*a* — до кронування дерев; *b* — після кронування дерев):
 1 — площа листків; 2 — довжина листків; 3 — ширина листків; 4 — індекс форми листків; 5 — накопичення сухої біомаси в листках; 6 — вміст води в листках; 7 — річний приріст дерев (I порядок); 8 — річний приріст дерев (II порядок); 9 — кількість листків річного приросту; 10 — F_m/F_s — індекс індукції флуоресценції хлорофілу в листках, % контрольного тест-об'єкта

ознак (*a* на рис. 2) і практично збігається з параметрами контрольних тест-об'єктів після їх кронування (див. *b*).

Адаптація дерев в екстремальних умовах ґрунтується на варіабельності, екологічній пластичності та стійкості фітоіндикаторних морфофізіологічних параметрів їх функціонального стану, де здатність рослинних організмів адаптовуватись до зміни зовнішніх умов докільля зумовлена змінами морфологічних структур та фізіологічних функцій, у яких відображена дія техногенного навантаження. Таку здатність рослинних організмів пристосовуватись до зміни умов навколишнього середовища Д. Гродзинський розглядав як прояв надійності біологічних систем, які володіють відповідними механізмами адаптації та стійкості [15].

Найвищим рівнем змін параметрів екологічної пластичності характеризуються морфофізіологічні ознаки річного приросту 1600% за довжиною однорічних пагонів II порядку і 538,3% для I порядку, а також накопичення сухої біомаси в листках (666,7%) та за показниками площі листків (558,9%), саме ці параметри визначають ступінь адаптивних змін рослин тополі пірамідальної в умовах техноурбанізованого докільля. Основній частині морфофізіологічних ознак функціонального стану рослин в екстремальних умовах властива значно нижча амплітуда змін фітоіндикаторних параметрів: довжина листків (285,7%), ширина (259,5%), індекс форми листків (256,1%), інтенсивність фотосинтетичних процесів за індексом флуоресценції хлорофілу в листках (241,5%), що характеризують високу стійкість тополі за цими ознаками. При цьому водний режим має найменшу екологічну пластичність (157,2%) і знаходиться на відносно постійному рівні, що забезпечує стабільний перебіг життєво важливих процесів у рослин виду.

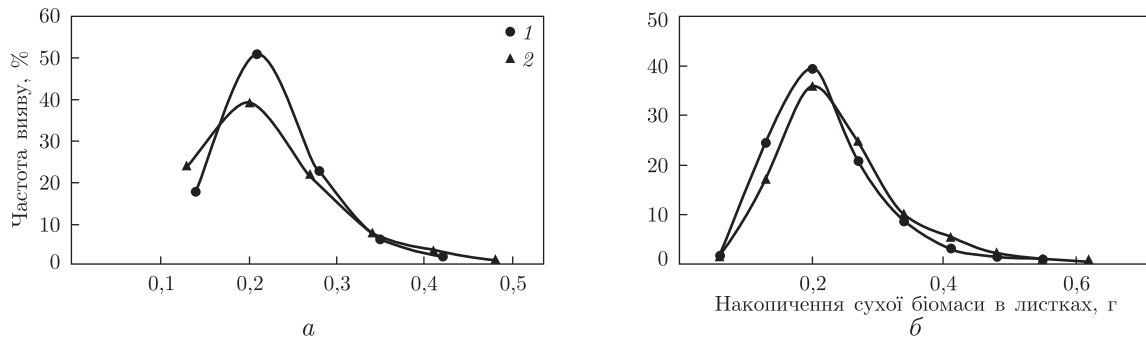


Рис. 3. Криві варіабельності показника накопичення сухої біомаси у листках тополі пірамідальної: *a* — ендогенна варіабельність: вул. акад. Лебедева; просп. Возз'єднання (1); *б* — внутрішньовидова варіабельність: вул. акад. Лебедева; просп. Возз'єднання (2)

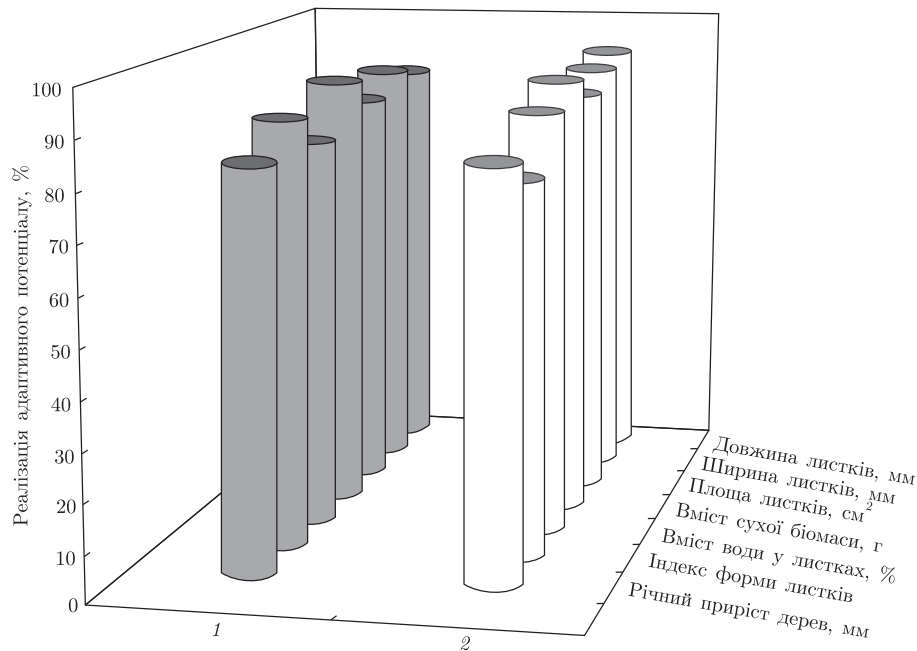


Рис. 4. Реалізація адаптивного потенціалу морфофізіологічних ознак тополі пірамідальної техногенно трансформованих урбодафотопів: 1 — онтогенетична адаптація; 2 — філогенетична адаптація

У кривих ендогенної та внутрішньовидової варіабельності морфофізіологічних ознак, практично відсутня асиметрія, що характерно для стійких видів дерев. Досліджені криві ендогенної (рис. 3, *a*) та внутрішньовидової (рис. 3, *б*) варіабельності фітоіндикаторних параметрів функціонального стану тополі пірамідальної в умовах техногенного забруднення максимально перекриваються з кривими контрольного тест-об'єкта, як це показано для параметра накопичення сухої біомаси у листках (рис. 3).

Після кронування дерев тополі пірамідальної спостерігається значне зростання величин реалізації адаптивного потенціалу морфофізіологічних ознак функціонального стану рослин, які знаходяться в межах 80,9–91,2% — онтогенетична та 77,4–92,3% — філогенетична адаптації (рис. 4).

Отже, стратегія виживання тополі пірамідальної в екстремальних умовах базується на захисті фотосинтезуючих органів рослин. При цьому рослинний організм має здатність стримувати надходження іонів Na^+ від коріння до наземної частини, де рівень токсичності іонів Na^+ у кореневій системі нижчий у 5,4 раза, ніж у листках, що визначає стратегію адаптивних змін фітоіндикаторних морфофізіологічних ознак функціонального стану рослин у техногенному середовищі. Відмирання стовбурових верхівок та гілок крони (суховершинність) активізує бокові сплячі бруньки, пагони яких володіють додатковою стійкістю порівняно з материнським організмом, що сприяє відновленню функціонального стану рослинного організму за індикаторними морфофізіологічними параметрами та обумовлює відносну стійкість виду тополі пірамідальної в умовах урботехногенного забруднення.

1. Левон Ф. М. Вуличні насадження Києва: сучасний стан, шляхи оптимізації // Наук. вісн. НАУ. Лісівництво. – 1999. – № 20. – С. 109–118.
2. Гришко В. Н. Ростовые процессы у древесных растений, произрастающих в условиях городской среды с технической нагрузкой разной степени // Доп. НАН України. – 1999. – № 8. – С. 179–182.
3. Артамонов В. И. Растения и чистота природной среды – Москва: Наука, 1986. – 175 с.
4. Парпан В. І., Миленька М. М. Морфологічні особливості *Populus pyramidalis* Roz. в умовах урботехногенного забруднення середовища // Екологія та ноосферологія. – 2009. – 20, № 3–4. – С. 84–90.
5. Луцишин О. Г., Радченко В. Г., Палана Н. В., Яворовський П. П. Моніторинг забруднення систем ґрунт-рослина фітотоксичними елементами в зелених зонах м. Київ // Доп. НАН України. – 2010. – № 2. – С. 194–200.
6. Луцишин О. Г., Тесленко І. К., Белошапка Т. В., Ткаченко І. В. Адаптація деревних рослин техногенно трансформованих урбодифотопів (на прикладі м. Київ) // Там само. – 2013. – № 5. – С. 186–192.
7. Кабанов В. В., Мясоедов Н. А. Токсичность катионов щелочных металлов для растений томатов // Физиология растений. – 1974. – 26, вып. 2. – С. 391–397.
8. Шевякова Н. И. Кузнецов В. В., Карпачевский Л. О. Причины и механизмы гибели зеленых насаждений при действии техногенных факторов городской среды и создание стресс – устойчивых фитоценозов // Лесн. вестн. – 2000. – № 6. – С. 25–33.
9. Радченко В. Г., Луцишин О. Г., Палана Н. В. та ін. Функціональний стан гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum* L.) в умовах техногенного забруднення довкілля Київського мегаполісу // Екологія та ноосферологія – 2010. – 21, № 1–2. – С. 4–18.
10. Кулагин А. А. Реализация адаптивного потенциала древесных растений в экстремальных лесорастительных условиях: Автореф. дис. . . . д-ра биол. наук. – Тольятти, 2006. – 35 с.
11. Иванов В. Б., Быстрова Е. И., Серегин И. В. Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в связи с проблемой специфичности и избирательности их действия // Физиол. растений. – 2003. – 30, № 3. – С. 443–454.
12. Рослякова Т. В., Лазарева Е. М., Соколик А. А. и др. Солеустойчивость ячменя: взаимосвязь экспрессии изоформ вакуолярного Na^+/H^+ – антипортера с накоплением Na^+ // Там же. – 2011. – 58, № 1. – С. 28–39.
13. Казарян В. О. Старение высших растений – Москва: Наука, 1969. – 284 с.
14. Федорова А. Н., Шунелько Е. В., Михеева М. А. Причины суховершинности и усыхания пирамидальных тополей в г. Воронеже // Вестн. ВГУ. Сер. химия, биология, фармация. – 2010. – № 2. – С. 108–113.
15. Гродзинский Д. М. Надежность растительных систем – Киев: Наук. думка, 1983. – 368 с.

Е. Г. Луцишин, И. К. Тесленко, В. В. Быков

Стратегия выживания древесных растений тополя пирамидального (*Populus pyramidalis* Roz.) в условиях урботехногенного загрязнения

Преимущественная локализация ионов Na^+ в корневой системе тополя пирамидального определяет направленность адаптивных изменений и стратегию выживания вида в условиях техноурбоэдафотопов мегаполиса. Накопление кризисных концентраций Na^+ в корневой системе ускоряют формирование суховершинности деревьев, в процессе которого активизируются боковые спящие почки, побеги которых обладают дополнительной устойчивостью по сравнению с материнским организмом, что способствует восстановлению функционального состояния растений с высокой степенью реализации адаптивного потенциала морфологических признаков на уровне онтогенетической (80,9–91,2%) и филогенетической адаптации (77,4–92,3%).

O. G. Lutsyshyn, I. K. Teslenko, V. V. Bykov

Survival strategy of Bolle's poplar (*Populus pyramidalis* Roz.) wood plants under urbotecnogenic pollution conditions

The main localization of Na^+ ions in the root system of Bolle's poplar determines the adaptation and the survival strategy of species under technourboedaphotopic conditions of a megalopolis. Accumulation of Na^+ ions in critical concentrations in the root system accelerates the top drying of trees. It forces the activity of dormant lateral buds, shoots of which have additional resistance comparing to the parent organism, which favors the restoration of a plant functional state with high level of adaptive potential implementation of morphophysiological features at the level of ontogenetic (80.9–91.2%) and phylogenetic adaptations (77.4–92.3%).