

ECOLOGICAL MORPHOLOGY AND PHYSIOLOGY OF PLANTS



O. G. Lucyshyn  Dr. Sci. (Biol.), Sen. Sci. Res.
I. K. Teslenko

UDK 574:504.064:477.25


*Institute for evolution ecology of NAS of Ukraine,
Lebedeva str., 37, Kyiv, Ukraine, 03143*

SPECIES SPECIFICITY OF WOODY TREES ADAPTATION AT TECHNOGENICALLY TRANSFORMED URBAN HABITATS OF THE KYIV MEGALOPOLIS

Abstract. The recent ecological situation of Kyiv megalopolis has a special specific of environment technogenic pollution as a chemical features and content of polluting phytotoxicants. During 2007-2012, our observation revealed what the most dangerous factors which have harm impact on the street woody plants are the huge concentration of phytotoxic elements (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}). Nowadays, the technogenic impact on the megalopolis surrounding comes to the dangerous, even, catastrophic level. The main reason of total and chloral necrose of leaves, the summer defoliation of crown and major tree's death is the over pollution of the soil and plant's phytomass by phytotoxic elements, the concentration of which by standards evaluation and by trees reactions are critical and exists at the level of adaptation possibility and survival.

The main sources of Pb^{2+} and Cd^{2+} ions are transport outcomes (> 90 % of total technogenic pollution). The increasing of Pb^{2+} and Cd^{2+} in the soil is depended from intensivity of transport outcomes, using of ethylated petrol, and location of trees along roads as well as from the trees species. Continuously increasing of number of cars at the city streets is accompanying with similar increasing of ions concentration. Thus, in the soil around root system of street woody plants, depending from their location along roads, the concentration of Pb^{2+} (moving form) is between 41,7 (I. Kudri str.) and 102,6 mg/kg of soil (Nauki avenue). It exceeds the maximum permissible concentration (MPC), which is 20,8–51,3 mg/kg of soil. Next, for Norway maple (*Acer platanoides*) the concentration of Pb^{2+} in the soil varies from 41,7 to 80,5 mg / kg of soil in the area of the root system and it is around 20,8–40,2 MPC. In the leaves of this tree it is 7,83–13,5 mg / kg of dry mass (MPC is 15,8–27,0). For the horse chestnut (*Aedculus hippocastanum*) at the Nauka avenue, the concentration of plumbum in the root is 13,4 mg / kg (MPC is 26,8), in the cortex – 17,7 mg / kg (MPC is 35,4), in leaves – 8,21 mg / kg (MPC is 16,4), which by the normative evaluation are the critical concentrations.

The source of Na^+ and Cl^- , which is a new factor for Kyiv megalopolis, is irregular load of high concentrations of industrial salt NaCl into the environment, as a way against black ice in winter time, where the Na^+ ions (mobile form) is in the high concentrations in leaves (0,76 % for Norway maple (*Acer platanoides*) on the I. Kudri str., 1,28 % – small-leaved linden (*Tilia cordata*) at the 40-richya Zhovtnya ave, 2,0 % – horse chestnut (*Aedculus hippocastanum*) at the Nauki ave), those are

 Tel.: +38067-105-59-13. E-mail: OlenaLutsyshyn@i.ua

DOI: 10.15421/031519

exceeded the concentration of the element comparing to the control test object, respectively, in 10,6, 12,8 and 5,0 times. Na^+ ions are an aggressive phytotoxins and the main factor of leaves necrose of tree crown (within 70–100 % necrosis leaves in the crown).

Degradation and total reduction of the specific weight of plants in the megalopolis environment are decrease the cleaning role of the street tree plants, which are the main alive filters for soil and air cleaning, as well as the main bioaccumulators and detoxicants of harm substances of anthropogenic pollution.

Species adaptive specificity is revealed at the bioaccumulation level and the selective locality of phytotoxic elements (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} , agile form) in technourbanhabitats-pic conditions, there dominated bioaccumulation and localization of Na^+ ions by trees assimilative system is caused the adaptive orientation of endogenic and intraspecific variability of phytoindicative morphophysiological features of plants functional condition under the stressing factors. This also is defined the sensitivity of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.), norway maple (*Acer platanoides* L.) and horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) to the big concentration of potassium as the most danger one for the plant survival. The biggest accumulation of Na^+ ions at the roots of Lombardy poplar (*Populus pyramidalis* Roz.), Bolle's poplar (*Populus bolleana* Lauche) and sugar maple (*Acer saccharinum* L.) is lead to a higher resistance of their assimilation system. At the technourbohabitate-pic conditions, the level of realization of ontogenetic and phylogenetic adaptive capacity of the sensitive species of trees is harmfully low (21,3–44,3 %). It is at the level of survival/death of plants. The street Lombardy poplar, Bolle's poplar and sugar maple, despite of more higher level of their adaptation (68,4–87,7 %), still also can't fully adapt to the critical levels of technogenic pollution of megalopolis environment.

Keywords: megalopolis, woody plants, phytotoxic elements (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}), bioaccumulation, localization), morphophysiological features, variability, correlative relationship, adaptive capacity.

УДК 574:504.064:477.25

Е. Г. Луцишин
И. К. Тесленко

д-р биол. наук, стар. науч. сотр.

Институт эволюционной экологии НАН Украины,
ул. Акад. Лебедева, 37, г. Киев, Украина, 03143,
тел.: +38067-105-59-13, e-mail: OlenaLutsyshyn@i.ua

ВИДОВАЯ СПЕЦИФИЧНОСТЬ АДАПТАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ УРБЭДАФОТОПОВ

Аннотация. Видовая адаптивная специфичность проявилась на уровне биоаккумуляции и селективной локализации фитотоксических элементов (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} , подвижная форма) в условиях техноурбэдафотопов, где преимущественная биоаккумуляция и локализация ионов Na^+ ассимиляционной системой дерева обуславливает адаптивную направленность эндогенной и внутривидовой варибельности фитоиндикаторных морфофизиологических признаков функционального состояния растений при действии стрессовых факторов и определяет чувствительность видов липы сердцелистной (*Tilia cordata* Mill.), клёна остролистного (*Acer platanoides* L.), каштана конского обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) до чрезмерных концентраций элемента натрия как наиболее опасного для жизнеспособности растений. Преимущественное накопление ионов Na^+ в корне тополя пирамидального (*Populus pyramidalis* Roz.), тополя Болле (*Populus bolleana* Lauche) и клёна сахаристого (*Acer saccharinum* L.) определяет более высокую устойчивость их ассимиляционной системы. В условиях техноурбэдафотопов уровень реализации онтогенетического и филогенетического адаптивных потенциалов чувствительных видов деревьев катастрофически низкий (21,3–44,3 %) и находится на грани выживания/гибели растений. Уличные насаждения тополя пирамидального, тополя Болле, клёна сахаристого, несмотря на более высокие параметры адаптации (68,4–87,7 %), также не могут полностью адаптироваться к кризисным уровням техногенного загрязнения окружающей среды мегаполиса.

Ключевые слова: мегаполис, древесные растения, фитотоксические элементы (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} , биоаккумуляция, локализация), морфофизиологические признаки, варибельность, корреляционная взаимосвязь, адаптивный потенциал.

Інститут еволюційної екології НАН України,
вул. Акад. Лебедева, 37, м. Київ, Україна, 03143,
тел.: +38067-105-59-13, e-mail: OlenaLutsyshyn@i.ua

ВИДОВА СПЕЦИФІЧНІСТЬ АДАПТАЦІЇ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНИХ УРБЕДАФОТОПІВ КИЇВСЬКОГО МЕГАПОЛІСУ

Анотація. Видова адаптивна специфічність проявилась на рівні біоаккумуляції та селективної локалізації фітотоксичних елементів (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} , рухома форма) в умовах техноурбедофотопів, де переважна біоаккумуляція та локалізація йонів Na^+ асиміляційною системою дерев обумовлює адаптивну направленість ендегенної та внутрішньовидової варіабельності фітоіндикаторних морфологічних ознак функціонального стану рослин при дії стресових факторів, а отже, визначає чутливість видів липи серцелистої (*Tilia cordata* Mill.), клену гостролистого (*Acer platanoides* L.), гіркогоаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum* L.) до надмірних концентрацій натрію, як найбільш небезпечного для життєздатності рослин. Переважне накопичення йонів Na^+ у корінні тополі пірамідальної (*Populus pyramidalis* Roz.), тополі Болле (*Populus bolleana* Lauche) й клену цукристого (*Acer saccharinum* L.) визначає більш високу стійкість їх асиміляційної системи. В умовах техноурбедофотопів рівень реалізації онтогенетичного та філогенетичного адаптивного потенціалу чутливих видів дерев катастрофічно низький (21,3–44,3 %) і знаходиться на межі виживання / загибелі рослин. Вуличні насадження тополі пірамідальної, тополі Болле й клену цукристого, незважаючи на більш високі параметри адаптації (68,4–87,7 %), також неспроможні повністю адаптуватись до кризових рівнів техногенного забруднення довкілля мегаполісу.

Ключові слова: мегаполіс, деревні рослини, фітотоксичні елементи (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} ; біоаккумуляція, локалізація), морфологічні ознаки, варіабельність, корелятивний взаємозв'язок, адаптивний потенціал.

ВСТУП

Сучасна екологічна ситуація Київського мегаполісу відзначається особливою специфікою техногенного забруднення довкілля за складом та хімічними властивостями забруднюючих фітотоксикантів. На підставі наших досліджень протягом 2007–2012 років встановлено, що до найбільш небезпечних чинників, які згубно впливають на вуличні деревні рослини, належать надмірні концентрації фітотоксичних елементів (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}) (Lutsyshyn, 2010; Radchenko, 2010). На сьогодні техногенне навантаження на довкілля мегаполісу набрало небезпечних і, навіть, катастрофічних темпів. Основною причиною тотального некрозного та хлорозного ураження листяного покриву, літньої дефоліації крони та масової загибелі дерев є надмірні рівні забруднення ґрунту та фітомаси рослин фітотоксичними елементами, концентрації яких за нормативними оцінками та реакції – відповіді рослинного організму є кризовими і знаходяться на межі адаптивної можливості та виживання.

Так, у 2012 р. вже наприкінці травня листки дерев у вуличних насадженнях гіркогоаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum* L.), липи серцелистої (*Tilia cordata* Mill.), клену гостролистого (*Acer platanoides* L.) почали некротизувати (буріти), а в липні на деревах, які ростуть вздовж автотрас з інтенсивним рухом автотранспорту спостерігалася масова дефоліація крони, від чого місто мало жалюгідний вигляд.

Основними джерелами йонів Pb^{2+} і Cd^{2+} є автотранспортні викиди (> 90 % від загального техногенного забруднення). Накопичення Pb^{2+} і Cd^{2+} у ґрунті залежить від інтенсивності автотранспортних викидів, використання етильованого бензину, розташування дерев вздовж автотрас і виду дерев. Невпинне зростання кількості автотранспорту на вулицях міста супроводжується таким же невинним зростанням концентрації йонів: тільки для Pb^{2+} (рухома форма) у ґрунті в зоні кореневої системи

вуличних деревних насаджень залежно від їх розташування вздовж автотраси концентрація коливається від 41,7 (вул. І. Кудрі) до 102,6 мг\кг ґрунту (просп. Науки), що перевищує гранично допустиму концентрацію (ГДК) у 20,8 – 51,3 ГДК. Так, для клену гостролистого концентрація Pb^{2+} коливається у ґрунті в зоні кореневої системи від 41,7 до 80,5 мг\кг ґрунту і становить 20,8–40,2 ГДК, у листках 7,83–13,5 мг\кг сухої маси листків (15,8–27,0 ГДК), відповідно, для гіркогоаштану звичайного на просп. Науки концентрація свинцю у корінні – 13,4 мг\кг (26,8 ГДК), корі – 17,7 мг\кг (35,4 ГДК), листках – 8,21 мг\кг (16,4 ГДК), що за нормативними оцінками є кризовими концентраціями (Huralchuk, 2006).

Джерелом Na^+ і Cl^- є новий для Київського мегаполісу фактор – ненормоване внесення у довкілля високих концентрацій технічної солі $NaCl$, як засіб боротьби проти ожеледиці в зимовий період, де йони Na^+ (рухома форма) при високих концентраціях у листках (0,76 % для клену гостролистого на вул. І. Кудрі; 1,28 % – липи серцелистої на просп. 40-річчя Жовтня; 2,0 % – гіркогоаштану звичайного на просп. Науки), що перевищують концентрацію елемента відносно контрольного тест-об'єкта, відповідно, у 10,6; 12,8 і 5,0 разів. Йони Na^+ є агресивними фітотоксикантами і основними чинниками некротизації листяного покриву крони дерев (в межах 70–100 % некротизованих листків крони) (Lutsyshyn, 2010).

Деградація і тотальне скорочення питомої ваги рослинності у довкіллі мегаполісу послаблює очисну функцію вуличних деревних насаджень, які є основними живими фільтрами при очищенні ґрунтів і повітря та основними біоаккумуляторами й детоксикаторами шкідливих речовин техногенного забруднення (Ilkun, 1978).

Системні дослідження в цьому напрямі та природоохоронні заходи в столиці практично відсутні, тому проблема адаптації та виживання дерев у довкіллі мегаполісу є актуальною, оскільки рівень техногенного забруднення у довкіллі постійно зростає й наростання темпів деградації рослинності невідворотне (тільки за перший зимовий день 2012 р. на вулиці Києва викинуто 2200 кг технічної солі $NaCl$).

Крім того техногенне забруднення ґрунту фітотоксичними елементами спричинило формування специфічної техногенно трансформованої урбопедосистеми, де фізико-хімічні властивості та хімічний склад ґрунтів модифікуються, і ґрунт, як один із важливих біогеохімічних бар'єрів на шляху міграції фітотоксичних сполук, деградує й частково втрачає свої основні функції та є малопридатним для росту і розвитку деревних насаджень (Lutsyshyn, 2011).

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Екомоніторинг ґрунтів і функціонального стану деревних рослин проводився на території лісового масиву Феофанії як природної зеленої зони, що зазнала мінімального впливу техногенного навантаження, а також на модельних ділянках парку ім. О. Пушкіна, вуличних насадженнях вздовж автотранспортних магістралей і тротуарів (просп. 40-річчя Жовтня, Науки, Ю. Гагаріна, Возз'єднання; вул. Метрологічної, Будівельників, Івана Кудрі, Кіквідзе), едафотопи яких знаходяться під впливом хронічного пролонгованого антропогенного та техногенного навантаження.

Об'єктом дослідження вибрані деревні рослини різних видів: липа серцелиста (*Tilia cordata* Mill.), клен гостролистий (*Acer platanoides* L.), клен несправжньо-платановий (*A. pseudoplatanus* L.), клен цукристий (*A. saccharinum* L.), гіркогоаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum* L.), тополя пірамідальна (*Populus pyramidalis* Roz.), тополя Болле (*P. bolleana* Lauche), які найбільш поширені у вуличних насадженнях м. Київ, де їх загальна питома вага на 1999 рік становила 90,5 % (Levon, 1999).

Відбір зразків ґрунту в зоні кореневої системи і фітомаси рослин (листки, кора 2–4-річних гілок, коріння, однорічні пагони дерев) проводились на модельних ділянках вулиць з різним рівнем техногенного забруднення. За контрольний тест-

об'єкт взяті деревні рослини природної зони лісового масиву Феофанії. Ґрунт і коріння відбирали за методом змішаного зразка на глибині 0–50 см. Відбір зразків листків, однорічних пагонів і кори з 2–4-річних гілок відбирали з нижнього ярусу крони, які найбільш зазнають техногенного забруднення, при цьому, два відбори проведені з двох сторін крони від автотраси, третій відбір від тротуару.

Для кожної тест-групи відбирали по 7–10 дерев 25–35 річного віку та по 30–300 листків і 50–300 однорічних пагонів з кожного дерева.

Дослідження проводились за хімічними показниками рівня техногенного забруднення ґрунту в зоні кореневої системи дерев, біохімічними показниками концентрації йонів фітотоксичних елементів (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} в рухомій формі) у системі ґрунт – рослина (ґрунт, коріння, листки, кора). Вміст йонів Na^+ визначали методом полум'яної фотометрії на фотометрі Flapho – 4 (Metodicheskoe posobie..., 1989), йонів Cl^- – прискореним біохімічним методом за Х. М. Починком (Рочупок, 1976), відповідно, концентрації йонів важких металів (Pb^{2+} , Cd^{2+}) – методом атомно-абсорбційної спектроскопії ААС-3 (Metodicheskie ukazaniya..., 1992). Інтенсивність фотосинтетичних процесів визначали за індексами індукції флуоресценції хлорофілу у листках на флуорометрі «Флоратест» (Romanov, 2012).

Коефіцієнт накопичення (Кн) вираховували по відношенню кількісного вмісту елементу в листках, корінні, корі вуличних насаджень до їх вмісту в контрольних тест-об'єктах (Sluchyk, 2000).

При цьому визначення рівнів забруднення фітотоксичними елементами ґрунту і фітомаси (коріння, листків, кори) проводили індивідуально для кожного дерева.

Для визначення індексу загального токсичного забруднення (Кі) ґрунту та фітомаси рослин використали математичну формулу, запропоновану авторами (Pozolotina, 2006):

$$K_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{C_{ji}}{N_{if}}$$

де K_i – індекс загальної токсичності кожного із об'єктів (ґрунт, листки, коріння, кора); n – кількість фітотоксичних елементів; C_{ji} – концентрація кожного елементу в рослинах техноурбодифотопів; N_{if} – концентрація кожного елементу у рослин контрольного тест-об'єкту.

Індекс стійкості рослин (I_c) до дії надмірних концентрацій фітотоксичних елементів визначали по відношенню абсолютних значень морфологічних ознак функціонального стану рослин техногенно трансформованих урбодифотопів до величини цієї ознаки в рослинах контрольного тест-об'єкту (Alekseeva-Popova, 1993).

Оцінку ендегенної та внутрішньовидової варіабельності проводили на основі кількісних значень морфологічних ознак за їх коефіцієнтами варіації (C_v , %) з використанням емпіричної шкали варіабельності ознак за С. А. Мамаєвим (Мамаєв, 1975). Адаптивний потенціал (%) визначали графічним методом за кривими варіабельності фітоіндикаторних ознак техногенних урбодифотопів відносно кривих варіабельності їх контрольного тест-об'єкту (Bezel, 2001). Статистичну обробку отриманих даних проводили за стандартними методиками з використанням комп'ютерної програми MS Excel з довірчою вірогідністю 0,95.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

1. Видова специфічність біоаккумуляції та локалізації фітотоксичних елементів у системі ґрунт-рослина. Катастрофічний функціональний стан деревних насаджень вздовж автотранспортних магістралей та тротуарів зумовлений хронічною дією фітотоксичних елементів у надмірних концентраціях, до яких деревні рослини еволюційно не пристосовані. За нашими даними життєздатність рослин у сучасних екологічних умовах Київського мегаполісу переважно залежить від рівня забруднення ґрунту і фітомаси дерев фітотоксичними елементами (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} ,

Cd^{2+}), їх концентрації та ступеню токсичності, реакції – відповіді на дію цих стресових факторів та видового складу дерев у довкіллі.

Індекс стійкості (Ic) досліджених видів за морфофізіологічними показниками функціонального стану рослин (накопичення біомаси листків, ширина, довжина, площа листків, річний приріст дерев) становить < 1,0, що свідчить про пригнічення їх життєздатності в умовах техногенно трансформованих урбоедафотопів мегаполісу, проте ступінь пригнічення переважно залежить від виду дерев (рис. 1). За ступенем стійкості (Ic) проаналізовані види розташовуються в ряд: тополя пірамідальна > клен гостролистий > гіркокаштан звичайний > липа серцелиста з різною чутливістю окремих морфофізіологічних ознак. Отже, дані види дерев мають різну стратегію захисту та адаптації в екстремальних умовах росту і розвитку рослин.

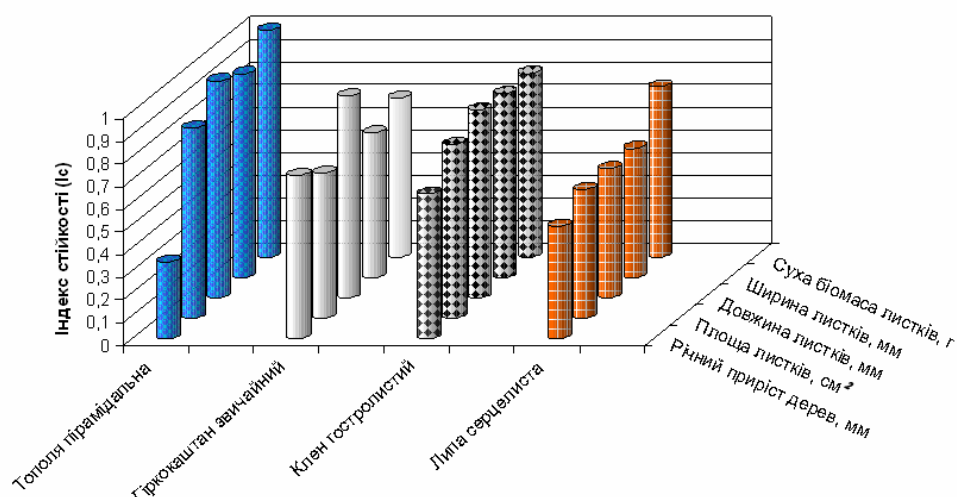


Рис. 1. Індекс стійкості (Ic) різних видів дерев за морфофізіологічними показниками ростових процесів в умовах техногенного забруднення довкілля м. Київ

В першу чергу, це відноситься до специфіки біоаккумулятивної здатності рослин та селективної локалізації фітотоксичних елементів в окремих органах і тканинах досліджених видів дерев. За величинами індексу (Ki) загального токсичного навантаження в системі ґрунт-рослина найвищою акумулюючою здатністю володіють види липи серцелистої (Ki – 5,6 у листках, корінні – 4,2; корі – 4,2) і клену гостролистого (Ki – 4,5 у листках, корінні – 2,1, корі – 2,6) з переважною локалізацією фітотоксикантів у листках. Для виду гіркокаштану звичайного накопичення (Ki) фітотоксичних елементів знаходиться в межах, відповідно, в листках – 1,9, корінні – 2,4, корі – 1,5.

Відносно низькою біоаккумуляючою здатністю володіють види тополі пірамідальної (Ki – 1,2 у листках, 2,3 – корінні, 1,3 – корі), а також тополі Болле (Ki – 1,0 у листках, корінні – 1,9, корі – 1,3) й клену цукристого (Ki у листках – 1,2, корінні – 3,3, корі – 0,9) з переважною біоаккумуляцією фітотоксикантів у корінні (рис. 2).

За ступенем акумулюючої здатності види дерев можна розташувати в ряд: липа серцелиста > клен гостролистий > гіркокаштан звичайний > тополя пірамідальна > тополя Болле > клен цукристий, де липа серцелиста має найвищу здатність накопичувати у своїй фітомасі фітотоксиканти, тополя пірамідальна, тополя Болле, клен цукристий – відносно низьку, що обумовлює стійкість даних видів в умовах техногенного забруднення довкілля.

Особливо чітко проявляється видова специфіка при дослідженні селективної локалізації елементів в окремих органах та тканинах рослин (перерозподіл елементів у фітомасі дерев) (рис. 3). За значеннями коефіцієнтів накопичення (Kn) найвищу локалізуючу здатність виявлено для йонів Na^+ (рухома форма) у листках липи

серцелистої (Кн – 16,6), клену гостролистого (Кн – 12,7) і гіркогоаштану звичайного (Кн – 4,8), відповідно, у корінні – 10,8; 3,5; 3,0 та корі – 11,2; 7,3; 2,3.

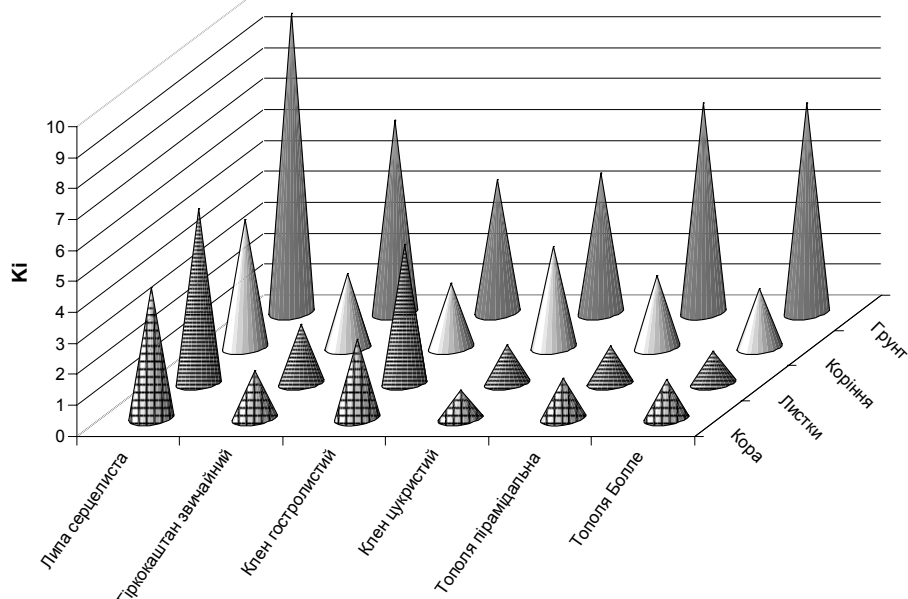


Рис. 2. Індекс (K_i) загального токсичного навантаження на ґрунт і фітомасу деревних рослин урбоєдафотопів

При цьому накопичення йонів Na⁺ у листках відбувається пропорційно вмісту елемента у ґрунті з переважною біоаккумуляцією в асиміляційній системі дерев, що обумовлює їх чутливість до надмірних концентрацій йонів Na⁺ у довкіллі мегаполісу і є основними чинниками некротизації листяного покриву крони та її літньої дефоліації, що в науковій літературі розглядається як своєрідна захисна реакція, яка дозволяє рослині очиститись від надлишку Na⁺ – забруднення при скиданні листяного покриву і не дати проявитися їх токсичності на рівні цілісного організму (П'кун, 1978).

У видів тополі пірамідальної, тополі Болле та клену цукристого йони Na⁺ локалізуються переважно у корінні: Кн для тополі пірамідальної у корінні становить 5,2, листках – 1,7, корі – 1,8. У клена цукристого концентрація йонів Na⁺ у корінні вища у 5,2 разів порівняно з листками.

У 60-ті роки минулого століття переважна більшість дослідників вважали, що катіон Na⁺ є нейтральним, а токсичність солі NaCl залежить від аніону Cl⁻ (Goncharik, 1968). На сьогодні погляди на роль катіонів Na⁺ в життєздатності рослин змінюються: елемент натрію вважається токсичним і не є необхідним елементом для рослин (Kabanov, 1974; Sheviakova, 2000).

Так, показано, що токсичність лужного катіона Na⁺ визначається рівнем концентрації йонів, типом тканин різних організмів і видом рослин: коефіцієнт токсичності (Кт) для рослин томатів при концентрації натрію 5,0 мг-екв/л у поживній суміші становив для листків Кт – 2,7, стебла – 1,59, коріння – 0,5 (Kabanov, 1974). При високих концентраціях іони Na⁺ викликають порушення всіх життєвих процесів у клітинах унаслідок утворення та накопичення токсинів, як продуктів розвитку процесів окислення ліпідів клітинних мембранних систем, тобто ініціюють прооксидантні процеси ліпідів мембранних систем (Kartashov, 2008). Експериментально показано, що накопичення проліну як антиоксиданта при високих концентраціях NaCl є реакцією на лужні катіони Na⁺ і роль аніона Cl⁻ незначна (Kabanov, 1974).

За рівнем біоаккумуляції та селективної локалізації йонів Na^+ в умовах техногенного забруднення довкілля дослідженні види розподіляються на чутливі та відносно більш стійкі. Якщо для видів липи серцелистої, клену гостролистого, клену несправжньо-платанового, гіркогоаштану звичайного з переважним накопиченням йонів Na^+ у листках ($\text{Na}^+ - 0,76-2,02\%$) ступінь некрозного ураження листяного покриву крони коливалась у межах 92,0–100 %, то для видів тополі пірамідальної, тополі Болле, клену цукристого ($\text{Na}^+ - 0,09-0,46\%$ в листках при $\text{Kn} - 1,06-1,72$) ступінь некротизації крони дерев точковим некрозом (найслабша ступінь некротизації) знаходилась на рівні 0,4–14,7 % (рис. 4).

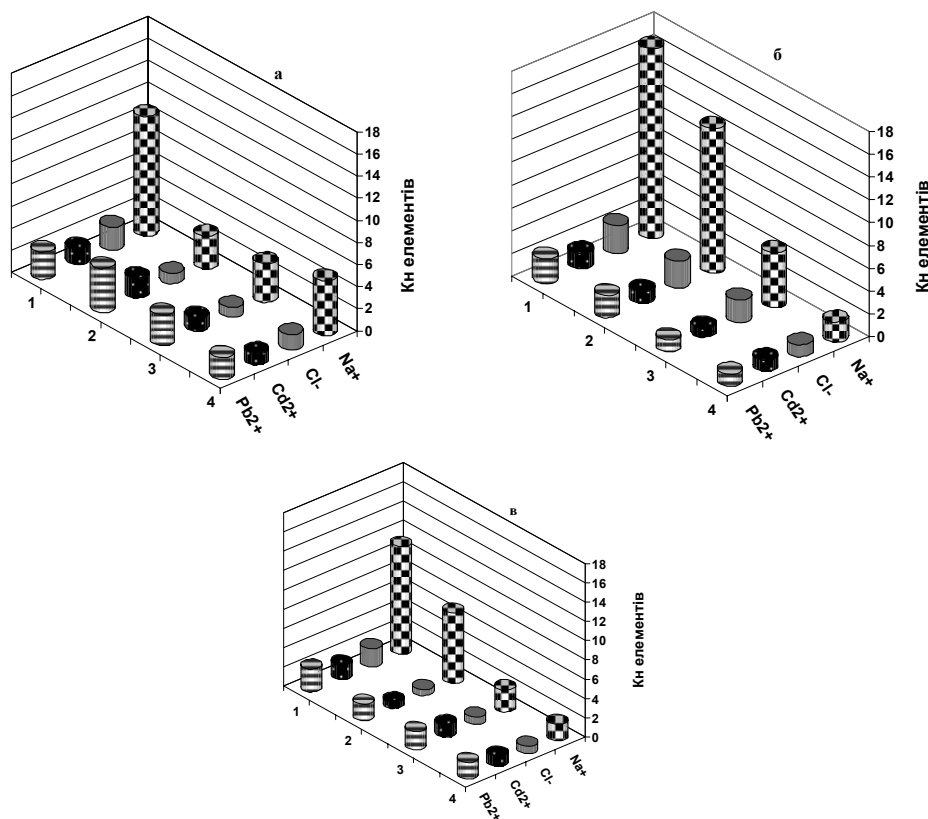


Рис. 3. Коефіцієнт накопичення (Kn) фітотоксичних елементів у фітомасі деревних рослин Київського мегаполісу:

а – коріння; б – листки; в – кора деревних рослин

Примітки: 1 – липа серцелиста; 2 – клен гостролистий; 3 – гіркогоаштан звичайний; 4 – тополя пірамідальна.

Отже, йони Na^+ у довкіллі Київського мегаполісу є найбільш небезпечними для життєздатності рослин і основними чинниками некротизації листків, що підтверджується статистичним аналізом кореляційних взаємозв'язків з достовірною корелятивною залежністю між рівнем Na^+ – забруднення у системі ґрунт – рослина (K_i і K_n) та ступенем некрозного ураження листків, ступенем стійкості (I_c) за фітоіндикаторними морфологічними ознаками функціонального стану дерев (Radchenko, 2010). Для йонів елементів Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} подібної жорсткої закономірності не виявлено.

Йони Pb^{2+} незалежно від виду дерев переважно локалізуються у корінні і корі, в найменшій мірі, у листках: так, коефіцієнт накопичення (Kn) Pb^{2+} у фітомасі

гіркокаштану звичайного становив, відповідно, у листках – 1,1, корінні – 4,0, корі – 1,9), що відповідає концентрації йонів у листках – 8,2 мг/кг сухої біомаси (16,4 ГДК), відповідно, корінні – 13,4 (26,7 ГДК), корі – 17,7 (35,3 ГДК). Для тополі пірамідальної Кн у корінні – 2,0, корі – 1,7, листках – 1,1, що становить – 20,1 ГДК у корінні, корі – 26,9 ГДК, листках – 15,8 ГДК. При цьому найвища локалізуюча здатність коріння виявлена для клену цукристого, де кратність перевищення концентрації Pb^{2+} у корінні відносно листків становила 5,4, що відповідає 51,3 мг/кг у корінні і 10,95 мг/кг сухої біомаси – листках.

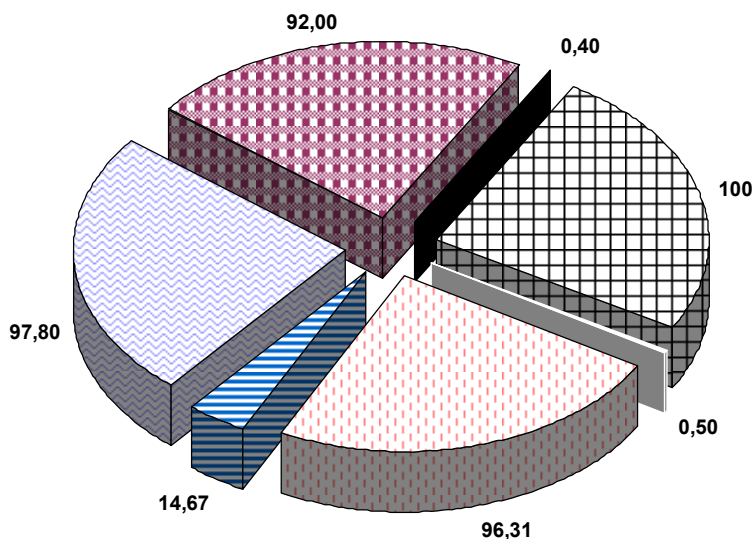


Рисунок. 4. Ступінь некротичного ураження листяного покриву крони різного видового складу деревних вуличних насаджень

Точковий некроз: ■ – тополя пірамідальна (*Populus pyramidalis* Roz.); ■ – клен цукристий (*Acer saccharinum* L.); ■ – тополя Болле (*Populus bolleana* Lauche); крайовий і міжжилковий некроз: ■ – клен несправжньо-платановий (*Acer pseudoplatanus* L.); ■ – гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum* L.); ■ – липа серцелиста (*Tilia cordata* Mill.); ■ – клен гостролистий (*Acer platanoides* L.); % від тест-контролю.

Для йонів Cd^{2+} характерна переважна локалізація у корі, проте, перевищення концентрації йонів Cd^{2+} у корі по відношенню листків незначне (відповідно, для тополі пірамідальної концентрація у листках становила 2,89 ГДК (0,87 мг/кг сухої біомаси), для корі – 4,0 ГДК (1,20 мг/кг сухої біомаси); для липи серцелистої у листках – 3,9 ГДК (1,16 мг/кг сухої біомаси), корі – 8,5 ГДК (2,55 мг/кг сухої біомаси).

Переважає локалізація основної частини йонів Pb^{2+} , Cd^{2+} у корінні та корі в науковій літературі розглядається як еволюційно-приспосувальний процес захисту фотосинтезуючих і генеративних органів рослин, що обумовлено наявністю у рослин ефективних фізіологічних і біохімічних механізмів захисту асиміляційної системи на рівні фізіологічних бар'єрів надходження елементів та біохімічних систем зв'язування й знешкодження їх токсичної дії. Свинець і кадмій відносяться до числа небезпечних фітотоксикантів, техногенне забруднення якими довкілля м. Києва катастрофічно зростає, оскільки досліджені важкі метали володіють високим кумулятивним ефектом, не піддаються біодеградації та практично не виводяться із рослинного організму (Seregin, 2001).

При дослідженні токсичності йонів Pb^{2+} і Cd^{2+} та механізму їх дії на молекулярному рівні, окремих органів і цілісного організму показано, що надмірні

концентрації важких металів Pb і Cd є стресовими факторами і реакція – відповідь рослинного організму на їх дію розвивається за одним і тим же механізмом, як для йонів Na^+ . При дії їх іонів відбувається дезінтеграція клітинних мембранних систем та порушення їх проникності внаслідок активації перекисного окислення мембранних ліпідів, що призводить до зміни активності ферментних систем, порушення синтезу білків, деградації молекул хлорофілу з наступним гальмуванням фотосинтетичних процесів (Savinov, 2007; Kartashov, 2008).

Для досліджених видів концентрація йонів Cl в умовах техноурбоєдафотопів за величинами коефіцієнтів накопичення (Кн) у фітомасі дерев переважно коливалася в межах 0,81–1,16 у листках (за винятком липи серцелистої та клену гостролистого, де Кн хлору у листках, відповідно, становить 2,45 і 2,36), корінні – (0,53 і 1,40), корі – (0,62 і 0,77) практично знаходяться на рівні концентрації у рослин контрольного тест-об'єкту, де некротизації листків не виявлено. Отже, в тих концентраціях, які існують у довкіллі мегаполісу, йони Cl не є настільки агресивними як Na і не є основними чинниками некротизації листяного покриву крони дерев.

2. Направленість адаптивних змін фітоіндикаторних морфофізіологічних ознак та адаптивний потенціал деревних рослин в урботехногенному середовищі Київського мегаполісу. Виявлена видова специфічність біоакмуляції та селективної локалізації фітотоксичних елементів у фітомасі досліджених дерев визначає амплітуду варіабельності й адаптивну стратегію відповідних змін морфофізіологічних ознак, а, отже, і стійкість рослин техноурбоєдафотопів.

Варіабельність морфофізіологічних ознак, як фітоіндикаторів функціонального стану дерев в умовах техногенного забруднення, є важливою характеристикою, як критерій здатності їх адаптуватись до екстремальних умов (Bezel, 2001; Korshikov, 1996).

Дослідження закономірностей і динаміки варіабельності в градієнті токсичного навантаження дозволяє визначити направленість адаптивних змін фітоіндикаторних ознак на рівні окремих індивідумів (ендогенна варіабельність) і на рівні виду (внутрішньовидова варіабельність), оцінити величину амплітуди варіабельності за коефіцієнтом варіації (C_v , %) та адаптивний потенціал як інтегральної величини різних видів адаптації.

Критеріями оцінки закономірностей адаптивної реакції та направленості адаптивних змін деревних рослин при зміні умов довкілля використані морфофізіологічні ознаки: площа, довжина, ширина, індекс форми листків, накопичення біомаси листків, річний приріст дерев, інтенсивність фотосинтетичних процесів за індексом F_m індукції флуоресценції хлорофілу листків.

Дослідженнями показано, що амплітуда ендегенної та внутрішньовидової варіабельності морфофізіологічних ознак (накопичення біомаси листків, площа, довжина, ширина, індекс форми листків, інтенсивність фотосинтетичних процесів за індексом F_m) липи серцелистої, клену гостролистого, гіркокаштану звичайного в умовах техногенно сформованих урбоєдафотопів зростає відносно контрольного тест-об'єкта і за цими ознаками характеризує види як чутливі до техногенного забруднення довкілля міста (табл. 1) (Udovenko, 1988).

На відміну від чутливих видів амплітуди ендегенної та внутрішньовидової варіабельності морфофізіологічних показників тополі пірамідальної за коефіцієнтом варіації (C_v , %) характеризуються рівними або нижчими варіабельності контрольних тест-об'єктів, що властиво для більш стійких видів (див. табл. 1). Отримані закономірності варіабельності морфофізіологічних ознак різних видів свідчать про їх видову специфіку.

Специфічність динаміки варіабельності проявляється також на рівні окремих фітоіндикаторних ознак і для кожної групи ознак притаманний свій рівень ендегенної та внутрішньовидової варіабельності. За шкалою рівнів мінливості С. А. Мамаєва (Мамаєв, 1975) для чутливих видів окремі ознаки можна віднести до середніх рівнів – варіабельність індексу F_m , індексу форми листків; високих рівнів – варіабельності площі, довжини, ширини листків; дуже високих – накопичення

Таблиця 1

Амплітуда ендогенної та внутрішньовидової варіабельності морфобіологічних ознак деревних рослин
техногенно трансформованих урбосафотопів (Fm – індекс флуоресценції хлорофіла листків)

Вид дерев	Зона екомоніторингу	Коефіцієнт варіації, (Сv, %)							Fm
		Площа листків, см ²	Довжина листків, мм	Ширина листків, мм	Індекс форми листків	Абс. суха біомаса листків, г	Річний приріст дерев, мм		
Липа серцелиста	Лісовий масив Феофанії	Ендогенна варіабельність							9,99 ± 0,01
		37,12 ± 0,95	17,62 ± 0,82	15,50 ± 0,59	8,89 ± 0,05	36,58 ± 0,01	47,74 ± 0,04		
	Внутрішньовидова варіабельність							12,50 ± 0,01	
	43,25 ± 0,53	19,99 ± 1,09	19,14 ± 0,97	10,10 ± 0,01	44,81 ± 0,01	53,02 ± 0,01			
Гіркокаштан звичайний	Проспект 40-річчя Жовтня	Ендогенна варіабельність							13,60 ± 0,01
		40,0 ± 0,74	22,15 ± 0,73	23,0 ± 0,82	8,69 ± 0,05	49,48 ± 0,05	60,0 ± 0,27		
	Внутрішньовидова варіабельність							14,82 ± 0,01	
	51,68 ± 0,9	23,62 ± 1,30	23,65 ± 1,09	11,26 ± 0,13	51,17 ± 0,01	68,29 ± 0,21			
Клен гостролистий	Парк «Феофанія» Проспект Ю. Гагаріна	Ендогенна варіабельність							16,42 ± 0,01
		59,55 ± 4,02	25,28 ± 0,95	27,41 ± 3,13	15,21 ± 0,03	74,15 ± 0,05	57,60 ± 3,20		
	Внутрішньовидова варіабельність							18,22 ± 0,01	
	62,80 ± 4,42	29,51 ± 0,85	36,20 ± 2,99	20,50 ± 0,05	83,55 ± 0,04	57,70 ± 2,70			
Тополя пірамідальна	Лісовий масив Феофанії Вул. Івана Кудрі	Ендогенна варіабельність							15,20 ± 0,02
		60,57 ± 3,70	28,73 ± 1,90	26,74 ± 1,80	16,14 ± 0,02	61,60 ± 0,02	79,73 ± 0,16		
	Внутрішньовидова варіабельність							22,06 ± 0,02	
	68,90 ± 4,00	29,32 ± 2,14	33,30 ± 2,13	19,00 ± 0,01	63,74 ± 0,03	87,79 ± 3,00			
Тополя пірамідальна	Вул. акад. Лебедєва Проспект Возз'єднання	Ендогенна варіабельність							16,22 ± 0,01
		60,38 ± 1,14	24,43 ± 0,95	33,43 ± 1,45	17,88 ± 0,02	39,14 ± 0,03	98,16 ± 3,19		
		Внутрішньовидова варіабельність							16,30 ± 0,01
		40,96 ± 0,65	20,44 ± 0,77	18,57 ± 0,72	16,41 ± 0,01	40,92 ± 0,05	99,0 ± 3,70	16,30 ± 0,01	

біомаси листків, річний приріст дерев. Відповідно, для тополі пірамідальної до середніх рівнів відносяться ознаки довжини, ширини, індекс форми листків, індекс F_m індукції флуоресценції хлорофілу; високих рівнів – варіабельності показників площі листків, накопичення біомаси листків та річного приросту дерев, проте варіабельність цих ознак рівна або більш низька від амплітуди варіабельності контрольного тест-об'єкту.

Для кривих варіабельності чутливих видів в умовах техногенного забруднення характерна негативна (лівостороння) асиметрія, як це показано для параметрів інтенсивності фотосинтетичних процесів за індексом F_m індукції флуоресценції хлорофілу у листках гіркого каштану звичайного (рис. 5, а), що свідчить про суттєву перебудову фізіологічних і біохімічних процесів в структурній організації листків (Hnativ, 2001; Petrushenko, 1981). Негативна асиметрія виявлена також для чутливих видів липи серцелистої і клену гостролистого. Тобто, направленість адаптивних змін відбувається в напрямку мінімізації функцій таких, як зниження метаболізму (в першу чергу, зниження фотосинтетичної активності, а отже, й біосинтезу амінокислот, білків тощо), що проявляється у блокуванні ростових процесів у вигляді зменшення морфометричних розмірів листків у напрямку ксерофітизації, що є ознакою адаптивної зміни морфологічних ознак до зміни умов довкілля (Demkiv, 1995; Korshikov, 1996). На відміну від чутливих видів криві варіабельності морфологічних ознак тополі пірамідальної характеризуються слабкою асиметрією, як показано для показника індексу F_m інтенсивності фотосинтетичної активності, що властиво для більш стійких видів і характеризує вид, як відносно більш пристосований до техногенного забруднення фітотоксичними елементами (рис. 5, б).

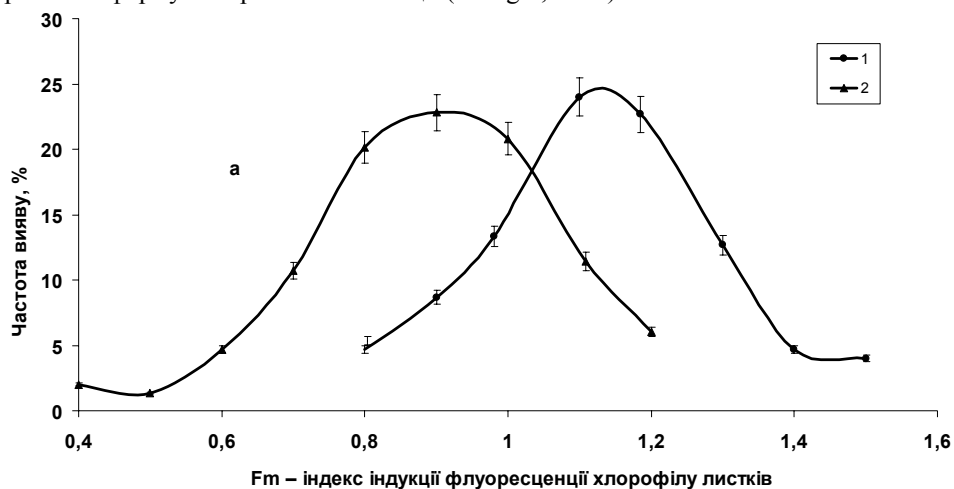
Отже, здатність рослинних організмів адаптуватися до зміни умов довкілля зумовлено змінами морфологічних структур і фізіологічних функцій, у яких відображена дія техногенного навантаження. Таку здатність рослинних організмів пристосовуватись до зміни умов середовища Д. М. Гродзинський розглядав як прояв надійності біологічних систем, які володіють можливими механізмами адаптації та стійкості (Grodzinskij, 1983). При цьому адаптивна здатність рослин визначає рівень їх стійкості, де стійкість до стресових факторів характеризується, як здатність організмів здійснювати свої основні життєві функції в несприятливих умовах зовнішнього середовища, а мірою стійкості, яка відображає кількісну величину адаптації, є рівень адаптивного потенціалу, де адаптивний потенціал розглядається як міра пристосувальних можливостей різних видів деревних рослин в умовах дії стресових факторів, до яких відносяться досліджені фітотоксичні елементи.

Дослідження специфіки формування адаптивного потенціалу ґрунтується на аналізі ендегенної (онтогенетична адаптація) та внутрішньовидової (філогенетична адаптація) варіабельності фітоіндикаторних морфологічних ознак та корелятивного взаємозв'язку між ними в умовах техногенного забруднення довкілля.

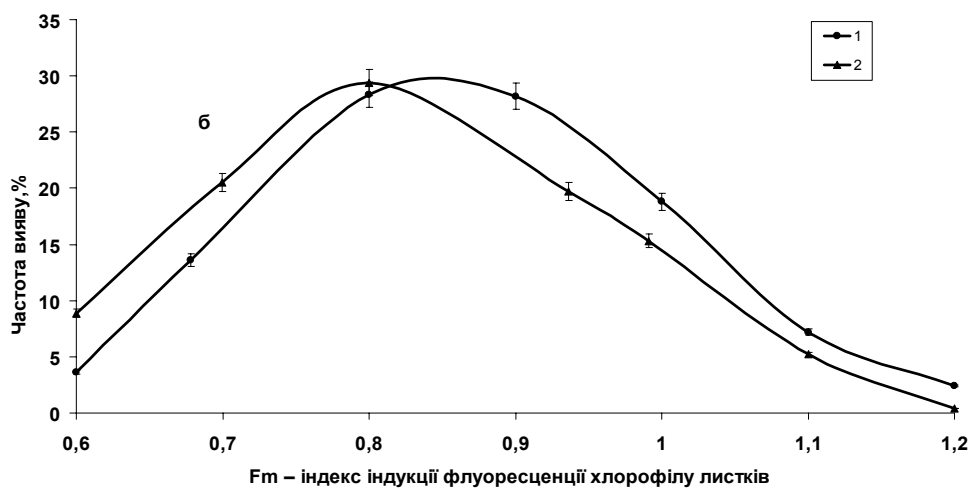
За дослідженими кривими варіабельності морфологічних ознак, як маркерів ростових процесів, різних видів деревних рослин техноурбодіафотопів, які мають негативну (лівосторонню) асиметрію і частково перекриваються з кривими контрольних тест-об'єктів, можна оцінити, якою мірою зміни функціональних параметрів урбанодіафлори відповідають умовам природних едафотопів (див. рис. 5, а, б).

Адаптовані до токсичного впливу фітоіндикаторні ознаки зберігають тим більшу здатність адекватно реагувати на техногенне забруднення, чим сильніше перекриваються криві варіабельності за їх параметрами з природними контрольними тест-об'єктами. Кількісну величину такої адаптивності в умовах техногенно трансформованих урбо-едафотопів можливо визначити за величиною площі перекривання кривих варіабельності природної та урбанодіафлори (Bezel, 2001). Оскільки адаптивний потенціал (%) вираховується графічним методом як відсоток площі перекривання від площі кривої варіабельності контрольного – тест-об'єкту, то отримані значення адаптивного потенціалу доцільніше розглядати як реалізацію вже

існуючого адаптивного потенціалу (адаптивний фонд) рослин, який рослинний організм сформував протягом еволюції (Kulagin, 1973).



a



б

Рис. 5. Криві мінливості інтенсивності фотосинтетичних процесів за індексом Fm-індукції флуоресценції хлорофілу листків різних за стійкістю видів деревних рослин:

a – гірकोкаштан звичайний: лісовий масив Феофанія (1); просп. Ю. Гагаріна (2);
 б – тополя пірамідальна: лісовий масив Феофанія (1); просп. Возз'єднання (2)

За значеннями реалізації адаптивного потенціалу (%) адаптивність морфологічних ознак (площа, довжина, ширина, індекс форми листків, річний приріст дерев) у видів липи серцелистої, клену гостролистого, гірकोкаштану звичайного є катастрофічно низькою. Реалізація адаптивного потенціалу досліджених ознак для липи серцелистої знаходиться в межах 21,33–30,89 % (онтогенетична адаптація) та, відповідно, філогенетична адаптація: для липи серцелистої – 26,56–51,25 %, клену гостролистого – 25,67–44,27 %, гірकोкаштану звичайного 34,76–41,51 % (рис. 6). Однак, при зниженні техногенного навантаження, як це спостерігалось у міському парку ім. О. Пушкіна, реалізація адаптивного потенціалу для показника площі листків липи серцелистої зростає до 58,7 %

порівняно з 26,5 % в умовах техноурбоєдафотопів (просп. 40-річчя Жовтня). Дещо вища адаптивність виявлена для показника вмісту води у листках (49,7–71,6 % – філогенетична адаптація) та показника накопичення сухої біомаси листків липи серцелистої (32,6–48,0 %), можливо за рахунок накопичення в листках високих концентрацій фітотоксичних елементів.

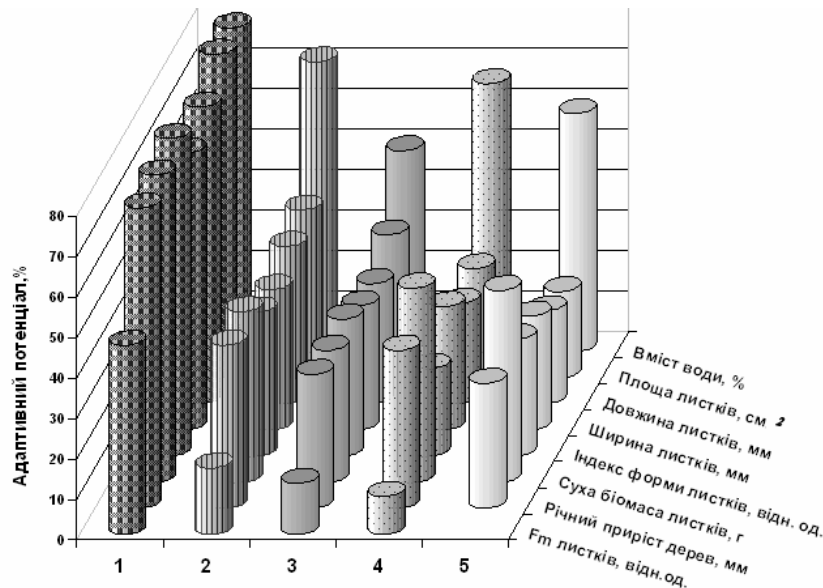


Рис. 6. Адаптивний потенціал (%) морфофізіологічних ознак деревних рослин техногенно трансформованих урбоєдафотопів (Fm – індекс індукції флуоресценції хлорофілу листків)

Філогенетична адаптація: 1 – тополя пірамідальна; 2 – гірकोкаштан звичайний; 3 – клен гостролистий; 4 – липа серцелиста; онтогенетична адаптація: 5 – липа серцелиста.

Адаптація фітоіндикаторних показників тополі пірамідальної (площа, довжина, ширина, індекс форми листків, вміст води, накопичення сухої біомаси листків, річний приріст дерев) виявилась найвищою: адаптивний потенціал реалізувався в межах 68,4–87,7 %. При цьому фотосинтетичні процеси за індексом Fm характеризуються катастрофічно низьким рівнем адаптації для чутливих видів дерев (9,49–16,44 %), проте, для відносно стійкого виду тополі пірамідальної виявився порівняно високим (46,7 %). За значеннями реалізації адаптивного потенціалу за індексом Fm досліджені види дерев розташувались в ряд: тополя пірамідальна (46,7 %) > гірकोкаштан звичайний (16,44 %) > клен гостролистий (12,9 %) > липа серцелиста (9,5 %).

3. Фактор корелятивного взаємозв'язку при адаптації деревних рослин в умовах техногенного забруднення. В якості критерію адаптації рослинних організмів урбанізованих територій нами використані показники ступеня щільності корелятивних залежностей між фітоіндикаторними морфофізіологічними ознаками, як показниками щільності взаємозв'язку між поліморфними ознаками, так і між рівнем техногенного забруднення та відповідними змінами основних морфофізіологічних ознак, які характеризують функціональний стан рослин у змінених умовах довкілля (Мамаєв, 1975; Petrushenko, 1981).

При дії стресових факторів відбувається перехід функціональних і структурних параметрів рослинного організму на новий рівень і такий перехід свідчить про початок адаптивних реакцій, що проявляється у зміні ступеня щільності корелятивного взаємозв'язку між параметрами функціонального стану організму та змінених умов зовнішнього середовища. При несприятливих умовах ступінь

зв'язаності і щільності взаємозв'язків зростає, що проявляється у збільшенні кількості коефіцієнтів кореляції та ступенем їх корелятивного взаємозв'язку.

Корелятивна залежність між фітоіндикаторними морфофізіологічними ознаками рослин та рівнем техногенного забруднення урбоедафотопів фітотоксичними елементами (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}) та відповідна кореляція між самими ознаками залежить від спроможності організму пристосовуватися до дії кризових рівнів фітотоксикантів у довкіллі (Petrushenko, 1981).

Для того, щоб дослідити взаємозв'язок змін морфофізіологічних ознак між собою (площа, довжина, ширина, вміст сухої біомаси, індексом форми листків, вміст води у листках, річний приріст дерев) і наскільки достовірно вони корелюють з умовами зовнішнього середовища та встановити кореляційні закономірності нами складені таблиці за кількістю коефіцієнтів кореляції та ступенем щільності їх корелятивних залежностей для видів дерев липи серцелистої, клену гостролистого, гіркогоаштану звичайного, тополі пірамідальної (Mamaev, 1975). Найбільша кількість коефіцієнтів кореляції з достовірно сильними кореляційними взаємозв'язками належать липі серцелистій, клену гостролистому, гіркогоаштану звичайному (табл. 2). Так, кількість коефіцієнтів кореляції $r > 0,70$ становить 30 % від загальної кількості досліджених кореляційних взаємозв'язків для липи серцелистої, відповідно, клену гостролистого – 30 %, гіркогоаштану звичайного – 26,6 %, що може свідчити про збільшення метаболічного потенціалу організму для збереження ряду функцій в екстремальних умовах (Korshikov, 1996). Для виду тополі пірамідальної, де морфофізіологічні ознаки більш адаптовані до високих рівнів фітотоксичного навантаження, спостерігалась більш слабка корелятивна щільність взаємозв'язку між ними: $r > 0,70$ – відсутні, що властиво для більш стійких видів дерев.

Таблиця 2

Розподіл коефіцієнтів кореляції (r) за кількістю та щільністю кореляційних взаємозв'язків між морфофізіологічними ознаками різних видів дерев в умовах техногенно трансформованих урбоедафотопів (% від загальної кількості вимірів)

	Кількість взаємозв'язків за коефіцієнтом кореляції, %			
	$r > 0,70$ – сильний взаємозв'язок	$r > 0,25$ – взаємозв'язок має середню щільність	$r > 0,15$ – слабкий взаємозв'язок	$r < 0,015$ – дуже слабкий взаємозв'язок
Липа серцелиста	30,0	20,0	10,0	40,0
Клен гостролистий	30,0	10,0	30,0	30,0
Гіркогоаштан звичайний	26,6	40,0	16,7	16,7
Тополя пірамідальна	0	50,0	10,0	40,0

Корелятивні взаємозв'язки, досліджені за парними коефіцієнтами кореляції Пірсона, між морфофізіологічними ознаками (інтенсивність фотосинтетичних процесів за індексами F_m/F_s – індукції флуоресценції хлорофілу листків, площі, довжини, ширини, сухої біомаси листків, вміст води у листках, річний приріст дерев) та рівнем забруднення ґрунту і фітомаси дерев (коріння, листки, кора) фітотоксичними елементами (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}) у досліджених видів дерев залежать від їх адаптивної здатності, видової специфічності біоаккумуляції й локалізації фітотоксикантів та їх хімічних властивостей.

Так, для клену гостролистого із 112 досліджених кореляційних взаємозв'язків кількість коефіцієнтів кореляції з достовірно сильними зв'язками між концентрацією фітотоксичних елементів і морфофізіологічними ознаками становила 65,0 (58,0 %) (табл. 3). Для тополі пірамідальної, відповідно, становила – 16,0 (14,3 %) (табл. 4).

Таблиця 3

Кореляційні взаємозв'язки між морфологічними ознаками і рівнем концентрації фітотоксичних елементів у ґрунті та фітомасі клену гостролистого (Fm/Fs – індекс індукції флуоресценції хлорофілу листків)

Ознаки	Ґрунт				Коріння				Листки				Кора			
	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺
Fm/Fs	-0,87	-0,77	-0,6	-0,43	-0,84	-0,74	-0,76	-0,01	-0,87	-0,77	-0,60	-0,43	-0,85	-0,61	-0,44	-0,84
Площа листків, см ²	-0,93	-0,24	-0,57	-0,76	-0,96	-0,50	-0,94	-0,45	-0,81	-0,92	-0,83	-0,14	-0,96	-0,94	-0,75	-0,72
Довжина листків, мм	-0,94	-0,21	-0,54	-0,74	-0,95	-0,47	-0,94	-0,48	-0,83	-0,94	-0,85	-0,11	-0,96	-0,95	-0,77	-0,70
Ширина листків, мм	-0,92	-0,21	-0,60	-0,79	-0,98	-0,47	-0,96	-0,42	-0,79	-0,93	-0,81	-0,17	-0,94	-0,95	-0,72	-0,75
Абсолютна суха біомаса, г	-0,83	-0,64	-0,33	-0,07	-0,52	-0,41	-0,48	-0,98	-0,94	-0,84	-0,93	-0,72	-0,78	-0,81	-0,97	-0,14
Річний приріст дерев, см	-0,07	-0,95	-0,97	-0,96	-0,87	-0,89	-0,89	-0,10	-0,35	-0,56	-0,39	-0,66	-0,65	-0,61	-0,27	-0,98
Вміст води в листках, %	-0,58	-0,73	-0,93	-0,90	-0,48	-0,93	-0,52	-0,61	-0,18	-0,04	-0,15	-0,96	-0,15	-0,10	-0,25	-0,93

Таблиця 4

Кореляційні взаємозв'язки між морфологічними ознаками і рівнем концентрації фітотоксичних елементів у ґрунті та фітомасі тополі пірамідальної (Fm/Fs – індекс індукції флуоресценції хлорофілу листків)

Ознаки	Ґрунт				Коріння				Листки				Кора			
	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	Pb ²⁺	Cd ²⁺
Fm/Fs	-0,71	-0,03	-0,64	-0,48	-0,37	-0,38	-0,71	-0,31	-0,03	-0,35	-0,4	-0,19	-0,3	-0,35	-0,12	-0,39
Площа листків, см ²	-0,18	-0,71	-0,17	-0,31	-0,25	-0,09	-0,28	-0,28	-0,27	-0,13	-0,72	-0,24	-0,44	-0,41	-0,04	-0,05
Довжина листків, мм	-0,25	-0,82	-0,21	-0,25	-0,16	-0,11	-0,33	-0,46	-0,04	-0,56	-0,64	-0,11	-0,32	-0,23	-0,08	-0,54
Ширина листків, мм	-0,7	-0,56	-0,64	-0,43	-0,48	-0,32	-0,62	-0,50	-0,19	-0,67	-0,76	-0,04	0,51	-0,03	-0,04	-0,47
Абсолютна суха речовина листків, г	-0,75	-0,76	-0,74	-0,67	-0,64	-0,35	-0,66	-0,31	-0,34	-0,41	-0,81	-0,23	-0,73	-0,21	-0,10	-0,43
Річний приріст, см	-0,46	-0,46	-0,43	-0,38	-0,30	-0,14	-0,52	-0,11	-0,53	-0,39	-0,78	-0,10	-0,64	-0,27	-0,07	-0,23
Вміст води, в листках, %	-0,32	-0,47	-0,35	-0,53	-0,22	-0,24	-0,54	-0,17	-0,18	-0,13	-0,41	-0,23	-0,51	-0,16	-0,52	-0,19

Найвища корелятивна щільність взаємозв'язків спостерігалась між іонами Na^+ та морфофізіологічними показниками функціонального стану клену гостролистого за винятком показника вмісту води в листках, відповідно, для тополі пірамідальної найвища корелятивна залежність спостерігається між іонами Pb^{2+} та окремими параметрами функціонального стану дерев.

Отже, розглянуті морфофізіологічні аспекти адаптації різних за стійкістю видів дерев свідчать, що при кризових рівнях техногенного забруднення кореляційна щільність між фітоіндикаторними ознаками функціонального стану рослинних організмів і концентрацією фітотоксичних елементів зростає у зворотній залежності від ступеня стійкості виду, тобто для чутливих видів зростає кількість і ступінь кореляційної щільності ознак між показниками функціонального стану рослини та параметрами техногенного забруднення довкілля Київського мегаполісу.

ВИСНОВКИ

Видова адаптивна специфічність проявилась на рівні біоаккумуляції, селективної локалізації фітотоксичних елементів (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}) при кризових концентраціях у ґрунті та фітомасі дерев, а також на рівні адаптивної направленості ендогенної й внутрішньовидової варіабельності фітоіндикаторних морфофізіологічних ознак функціонального стану чутливих видів (липи серцелистої, клену гостролистого, гіркогоаштану звичайного), низькою реалізацією адаптивного потенціалу, зміною кількості й ступеня щільності корелятивних зв'язків між зміною морфофізіологічних ознак рослинного організму та рівнями забруднення урбоєдафотопів, які визначають різну стійкість дерев в умовах довкілля мегаполісу.

Переважає біоаккумуляція та локалізація йонів Na^+ асиміляційною системою дерев обумовлює чутливість видів липи серцелистої, клену гостролистого та гіркогоаштану звичайного до надмірних концентрацій йонів Na^+ , як найбільш небезпечних для життєздатності рослин, що проявляється в ураженні крайовим і міжжилковим некрозом листяного покриву крони на рівні 80–100 %. Переважне накопичення йонів Na^+ у корінні тополі пірамідальної, тополі Болле й клену цукристого обумовлює більш стійку їх асиміляційну систему, де некрозне ураження листків проявляється на рівні точкових некрозів в межах 0,4 % для тополі пірамідальної, клену цукристого – 0,5 %, тополі Болле – 14,67 % листяного покриву крони дерев.

Рівень реалізації філогенетичного адаптивного потенціалу у найбільш поширених вуличних насадженнях видів дерев за їх фітоіндикаторними ознаками функціонального стану катастрофічно низький для чутливих видів (липи серцелистої – 26,56–51,3 %; клену гостролистого – 25,7–44,3 %, гіркогоаштану звичайного – 34,8–41,5 %) до техногенного забруднення довкілля і знаходиться на межі виживання/загибелі. Вуличні насадження, в тому числі, і тополя пірамідальна (адаптивний потенціал реалізується в межах 68,4–87,7), а також тополя Болле та клен цукристий, незважаючи на більш високі параметри адаптації, неспроможні повністю адаптуватись до кризових рівнів фітотоксичного забруднення елементами (Na^+ , Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+}), які на сьогодні існують у довкіллі Київського мегаполісу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

Alekseeva-Popova, N. V., Igoshina, T. I., 1993. Genotipicheskaya reaktsiya ustoychivosti k tsinku populyatsii shalfeya stepnogo [Genotypic reaction of resistance of shalfeya steppe population physiology and biochemistry of cultivated plants], *Fiziologiya i biokhimiya kulturnih rasteniy*, 25(1), 19–23 (in Russian).

Bezel, V. S., Pozolotina, V. S., Belsky, V. N., Zhuykova, T. V., 2001. Izmenchivost populyatsionnyih parametrov: adaptatsiya k

toksicheskim faktorom sredi [Variation of population parameters: adaptation to the toxic environmental factors], *Ekologiya*, 6, 447–453 (in Russian).

Hnativ, P. S., 2001. Osoblyvosti adaptatsiyi derev v antropohennomu dovkilli [Features of tree adaptation in the anthropogenic surrounding], *Naukovyy visnyk Uzhhorodskoho un-tu: Biologiya*, 1, 100–102 (in Ukrainian).

- Goncharik, M. N., 1968.** Fiziologicheskoe vliyanie ionov hlora na rasteniya [Physiologic affect of chloral ions on plants], Nauka i tehnika, Minsk (in Russian).
- Grodzinskiy, D. M., 1983.** Nadezhnost rastitelnykh sistem [Security of the plant systems], Nauk. dumka, Kyiv (in Russian).
- Huralchuk, Zh. Z., 2006.** Fitotoksichnist vazhkykh metaliv ta stiykist roslyn do yikh diyi [Phytotoxicity of heavy metals and plant resistance to their impact], Lohos, Kyiv (in Ukrainian).
- Demkiv, O. T., Khorkavtsiv, Ya. D., Kardan, O. R., Rechevska, N. Ya., 1995.** Stratehiya adaptatsiyi roslyn do nespryiatlyvykh faktoriv dovkilliya [The strategy of plant adaptation to the unfavorable environmental factors], Aktualni pytannya fiziolohiyi roslyn v aspekti ekolohichnykh problem Ukrainy. Chernivtsi, Kyiv, 19–20 (in Ukrainian).
- Ikun, G. M., 1978.** Zagryazniteli atmosfery i rasteniya [Pollutants of atmosphere and plants]. Nauk. dumka, Kyiv (in Russian).
- Kabanov, V. V., Myasoedov, N. A., 1974.** Toksichnost kationov shelochnykh metalov dlya rasteniy tomatov [The toxicity of cautions of alkali metals for tomato plants], Fiziologiya rasteniy, 26 (2), 391–397 (in Russian).
- Kabanov, V. V., Myasoedov, N. A., 1974.** Vliyanie shelochnykh elementov na sostav azotsoderzhaschih soedineniy listev tomatov [The effect of alkali elements on nitrogen-containing compounds of tomato leaves], Fiziologiya rasteniy, 21(6), 1223–1229 (in Russian).
- Kartashev, A. V., Raduina, N. L., Ivanov, U. V., 2008.** Rol sistemy antioksidantnoy zaschityi pri adaptatsii dikorastuschih vidov rasteniy k solevomu stresu [The role of antioxidant defense system at the adaptation of wild plant species to the salt stress], Fiziologiya rasteniy, 55 (4), 516–522 (in Russian).
- Korshikov, I. I., 1996.** Adaptatsiya rasteniy k usloviyam tehnogennogo zagryazneniya sredi [The adaptation of plants to the environmental technogenic pollution condition], Nauk. dumka, Kyiv (in Russian).
- Kulagin, Yu. Z., 1973.** Gazoustoychivost rasteniy i predadaptatsiya [The gas resistance of plant and preadaptation], Ekologiya, 2, 50–54 (in Russian).
- Levon, F. M., 1999.** Vulychni nasadzhennya Kyyiva: suchasnyy stan, shlyakhy optymizatsiyi [Street plants of Kyiv: recent state, ways of optimization], Naukovyy visnyk NAU, Lisivnytstvo, 20, 109–118 (in Ukrainian).
- Lutsyshyn, O. H., Radchenko, V. H., Palapa, N. V., Yavorovskyy, P. P., 2010.** Monitorynh zabrudnennya system grunt – roslyna fitotoksichnyimi elementami v zelenykh zonakh m. Kyiv [The pollution monitoring of systems of soil – plant by phytotoxic elements in green zones of Kyiv], Dopovidi NAN Ukrainy, 2, 194–199 (in Ukrainian).
- Lutsyshyn, O. H., Radchenko, V. H., Palapa, N. V., Yavorovskyy, P. P., 2010.** Morfofiziolohichna otsinka stanu rostovykh protsesiv derevnykh roslyn Kyivskoho mehapolisu za umov tekhnogenoho zabrudnennya dovkilliya [Morphophysiological evaluation of growing process of woody plants in Kyiv megalopolis under technogenic pollution of environment], Dopovidi NAN Ukrainy, 7, 188–195 (in Ukrainian).
- Lutsyshyn, O. H., Radchenko, V. H., Palapa, N. V., Yavorovskyy, P. P., Vesna, V. Ya., Skrypnyk, H. L., Kovalova, O. M., 2011.** Fyzyko-khimichni vlastyivosti gruntiv v umovakh Kyivskoho mehapolisu [Physical and chemical features of soils in Kyiv megalopolis conditions], Dopovidi NAN Ukrainy, 3, 197–204 (in Ukrainian).
- Lutsyshyn, O. H., Radchenko, V. H., Palapa, N. V., Yavorovskyy, P. P., 2010.** Makromorfolohichni zminy reaktsiyi – vidpovidi roslynnykh orhanizmiv derevnykh vulychnykh nasadzen Kyivskoho mehapolisu pry stresovomu rivni tekhnogenoho zabrudnennya [Macromorphological changes of reaction-answers of street woody plants of Kyiv megalopolis under stress level of technogenic pollution], Dopovidi NAN Ukrainy, 6, 180–187 (in Ukrainian).
- Mamaev, S. A., 1975.** Osnovnyie printsipy metodiki issledovaniya vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy [The main steps of methodic of investigation intraspecific variability of woody plants Individual ecologo-geographical variability of plants], Individualnaya ekologo-geograficheskaya izmenchivost rasteniy, Sb. nauchn. trudov, Uralskiy tsentr AN SSSR, Sverdlovsk, 3–16 (in Russian).
- Tsyifir, V. F., 1989.** Metodicheskoe posobie po analiticheskim robotam dlya agrohimicheskoy sluzhbyi Ukrainskoy SSR [Methodic textbook for analytic work of agrochemical service of Ukrainian SSR], Kyiv, Ukrainskiy filial TsINAU, Chast (in Russian).
- Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metalov v pochve selskohozyaystvennykh ugodiy i produktsii rastenievodstva, 1992 [Methodic guide for

heavy metals identification in the agricultural soil and crop production], Moscow (in Russian).

Petrushenko, V. V., 1981. Adaptivnyie reaktsii rasteniy: fiziko-himicheskii aspekt [Adaptive responses of plants: the physical and chemical aspects], Vischa shk., Kyiv (in Russian).

Pochinok, H. N., 1976. Metodyi biohimicheskogo analiza rasteniy [Methods of plants biochemical analysis], Nauk. dumka, Kyiv (in Russian).

Pozolotina, V. N., Antonova, E. V., Bezel, V. S., Zhuykova, T. V., 2006. Puti adaptatsii tsenopopulyatsii oduvanchika lekarstvennogo k dlitelnomu himicheskomu i radiatsionnomu vozdeystviyu [Ways of coenopopulations of medical dandelion adaptation to the long-term chemical and radiation exposure], Ekologiya, 6, 440–445 (in Russian).

Radchenko, V. H., Lutsyshyn, O. H., Palapa, N. V., Yavorovskyy, P. P., Kolomiyets, N. V., Kovalova, O. M., Teslenko, I. K., 2010. Funktsionalnyy stan hirkokashtanu zvychnyoho (Aesculus hippocastanum L.) v umovakh tekhnohennoho zabrudnennya dovkillya Kyivskoho mehapolisu [Functional state of horse chestnut (Aesculus hippocastanum L.) in the conditions of Kyiv megalopolis technogenic pollution], Ekology and Noospherology, 21, 1-2, 4–18 (in Ukrainian).

Romanov, V. O., Galelyuk, I. B., 2012. Kompyuternyy pryklad dlya ekspres-diahnostyky stanu roslyn: rezul'taty mizhnarodnoho proektu po pidhotovtsi do seriynoho vypusku [The computer example for express diagnoses of plant state: Results of international project for preparing to the number issues], Kompyuterni zasoby, merezhi ta systemy, 11, 91–98 (in Ukrainian).

Savinov, A. B., Kurganova, L. N., Shekunov, Y. I., 2007. Intensivnost perekislogo okisleniya lipidov Taraxacum officinale Wig. i Vicia cracc L. v biotopah s raznyimi urovnyami zagryazneniya pochv tyazhelyimi metalami [The intensity of superoxidizing of Taraxacum officinale Wig. and Vicia cracc L. lipids in biotopes which have different levels of heavy metals soil pollution], Ekologiya, 3, 191–197 (in Russian).

Seregin, I. V., Ivanov, V. B., 2001. Fiziologicheskie aspektyi tehnikeskogo deystviya kadmiya i svintsya na vysshie rasteniya [Physiological aspects of the technical impact of cadmium and lead on higher plants], Fiziologiya rasteniy, 48 (4), 606–630 (in Russian).

Sluchik, I. Y., Stefurak, I. P., 2000. Akumulyatsiya vazhkykh metaliv u pahonakh vydiv rodu Populus v umovakh urbanizovanoho seredovyshcha [Accumulation of heavy metals in the shoots in species of genus Populus in the urban environment], Naukovyy visnyk Chernivetskoho un-tu, Biolohiya, 77, 51–59 (in Ukrainian).

Udoenko, G. V., 1988. Diagnostika ustoychivosti rasteniy k stressovym vozdeystviyam [Diagnosis of plants resistance to stressing exposures], AN SSSR, Leningrad (in Russian).

Sheviakova, N. I., Kuznietsov, V. V., Karpachevckij, L. O., 2000. Prichiny i mehanizmy gibeli zelenykh nasazhdeniy pri deystvii tehnogennykh faktorov gorodskoy sredy i sozdanie stress-ustoychivyykh fitotsenozov [The causes and mechanisms of destruction of green space by the action of man-made factors of the urban environment and the creation of stress-resistant plant communities], Lesnoy vestnik, 6 (15), 25–33 (in Russian).

Стаття надійшла в редакцію: 17.09.2014

Рекомендує до друку: акад. НАН України, д-р біол. наук, проф. В. Г. Радченко