



УДК 581.17+581.19+58.02

## Зміни активності каталази в листі деревних і чагарникових рослин в умовах забруднення повітря сполуками флуору, сульфуру та нітрогену

Ю.Г. Приседський

*Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна*

Антропогенне забруднення довкілля чинить значний негативний вплив на екосистеми, порушуючи їх баланс, видовий склад тощо. Значної токсичної дії у промислових районах зазнають рослини. Разом із тим рослинні організми відіграють важливу роль у детоксикації поллютантів. У зв'язку з цим ми дослідили вплив промислового забруднення повітря комплексом сполук флуору, сульфуру та нітрогену на активність каталази у десяти видів деревних і чагарникових рослин, які різняться за стійкістю до забруднення повітря. Досліди вели за схемою повного багатofакторного експерименту з двома рівнями факторів. Активність каталази визначали йодометричним методом. Отримані результати оброблені статистично за допомогою дисперсійного аналізу та множинного порівняння середніх (метод Дункана). Поллютанти чинять вірогідний вплив на активність каталази у листках вивчених нами видів рослин, який залежить від стійкості рослин до забруднення, складу та концентрацій забруднювачів. У стійких видів (*Ligustrum vulgare* L., *Quercus robur* Sol., *Lonicera tatarica* L., *Eleagnus angustifolia* L., *Philadelphus coronaria* L.) активність ферменту або не змінюється, або підвищується на 11–218% порівняно з контролем залежно від складу забруднювачів, їх концентрацій та терміну дії. У видів зі змінною стійкістю за відсутності пошкоджень каталазна функція не змінюється. Чутливі до поллютантів види (*Sorbus aucuparia* L., *Fraxinus lanceolata* Borkh) характеризуються вірогідним зниженням каталазної активності на 20–77% залежно від терміну дії газів у всіх варіантах дослідження. У видів зі змінною стійкістю (*Aesculus hippocastanum* L., *Acer negundo* L., *Populus simonii* Carrière) реакція відповіді неоднозначна, залежить від наявності пошкоджень. Якщо листя цих рослин не має видимих пошкоджень (некрозів), активність ферменту не змінюється. За наявності уражень листкових пластинок каталазна функція знижується на 11–65% відносно контролю. Виявлений характер змін активності каталази дозволяє зробити висновок про значну роль ферменту у детоксикації поллютантів і зменшенні їх впливу на обмінні процеси рослинних організмів.

*Ключові слова:* стійкість рослин; комплексне забруднення повітря; антиоксидантні ферменти

## Changes in catalase activity in leaves of woody and bushy plants in the conditions of air pollution by compounds of fluorine, sulfur and nitrogen

Y. Prysedskyj

*Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnitsa, Ukraine*

Recently environmental pollution by industrial waste products has become a significant environmental factor that essentially limits the vital functions of plants and reduces their species diversity. The antioxidant system is of special importance for tolerance reactions of plants to stressful environmental conditions, in particular, contamination by industrial pollutants. One of the constituents of this system is oxidoreductase, including catalase. Consequently, we have conducted experiments to determine how the nature of the complex compounds of fluorine, nitrogen and sulfur influences catalase activity in leaves of selected species of trees and shrubs. The investigation was made according to the complete factorial experiment that allowed us to study the effect of these pollutants both individually and in combination. We used the iodometric method to determine the level of catalase activity. Statistical analysis of the obtained results was performed by means of dispersion analysis with the comparison according to the Duncan method. The results of the research showed the possible impact of pollutants on the activity of catalase, which depends on the resilience of the plants, structure and duration of potency of the pollutants. With less resilient plant species (*Sorbus aucuparia* L., *Fraxinus lanceolata* Borkh.) air pollution with a combination of fluorine, sulfur and nitrogen in most cases caused a reduction of catalase activity. Thus, in *S. aucuparia* a 5-hour exposure to low concentrations of pollutants ( $\text{HF} - 0.2 \text{ ml/m}^3$ ,  $\text{NH}_3 - 1.2 \text{ ml/m}^3$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0.9-1.0 \text{ ml/m}^3$ ) caused an inhibition of catalase activity by 40.5%, and a ten-hour expo-

sure caused a 61.4% inhibition compared with the control plants. With increased concentrations of pollutants catalase function was inhibited by 35.8–73.6%, depending on the duration of their fumigation. For *F. lanceolata*, the pollutants' effect on catalase activity caused a decrease in function of this enzyme by 20–77% compared with non-fumigated plants. In contrast to the less resilient plants, the species resilient against pollution (*Ligustrum vulgare* L., *Quercus robur* Sol., *Lonicera tatarica* L., *Eleagnus angustifolia* L., *Philadelphus coronaria* L.) were characterized by absence of possible changes in catalase activity caused by fumigation or by increase in catalase by 11–118%. A significant increase of catalase functions in these species mostly occurs because of the short-term effect (5 hours) of pollutants. In the absence of damage, the enzyme activity of species of variable resilience (*Aesculus hippocastanum* L., *Acer negundo* L., *Populus simonii* Carriere) remained at the level of the control plants. The gas mixture that damages leaves (necrosis) caused catalase functions to decrease by 11–80% compared with the control plants. Therefore, we can state that in the absence of visible damage to plants' enzyme activity either remained unchanged or increased compared with the control plants. Formation of necrosis caused a decrease in catalase functions. The patterns of changes in catalase activity we have identified allow us to conclude that this enzyme plays a significant role in liquidation of damage caused by air pollutants.

*Keywords:* plant resistance; integrated air pollution; antioxidant enzymes

## Вступ

Антропогенне забруднення довкілля промисловими, транспортними, сільськогосподарськими відходами останнім часом набуло значення глобального екологічного чинника (Sutinen, 1996; Bergman, 1999; Pertti, 2001; Mandal, 2006; Gandstase et al., 2013; Brygadyrenko and Ivanyshyn, 2015; Durga et al., 2015; Jing et al., 2016). Особливо значущі зміни довкілля характерні для України, де сконцентровані потужні підприємства хімічної, металургійної, енергетичної та інших галузей промисловості із застарілими технологіями (Bobyliov et al., 2014). Г.М. Лькун (П'кун, 1971, 1978) виділив особливий тип забруднення – український, який характеризується великим різноманіттям, високими концентраціями та далеким перенесенням поллютантів. Такі характеристики визначають небезпеку не тільки для України, а і для суміжних країн. Забруднення довкілля спричинює значне обмеження процесів життєдіяльності рослин (Sharma et al., 1980; Soda, 2000; Ditzengremel, 2001), знижує їх продуктивність (Pack, 1971; Ganatsasa et al., 2011), викликає зменшення і загибель видового різноманіття (Cape, 1993).

Один із процесів у рослинних організмах, який спричинюється різноманітними несприятливими факторами середовища, – окисидантний стрес, викликаний накопиченням активних форм кисню та вільних радикалів. Накопичення окисидних речовин і активних форм кисню можуть викликати низькі температури, порушення балансу між діоксидом карбону та киснем (Luma et al., 2016), дія важких металів і засолення ґрунту (Klump et al., 2000), забруднення атмосферного повітря (Olszyk et al., 1991; Langebartels et al., 2002; Frei et al., 2012; Czegeny et al., 2016). Велике значення в реакціях толерантності рослин до стресових умов довкілля, зокрема, забруднення промисловими поллютантами, має антиоксидантна система. Одна зі складових цієї системи – оксидоредуктази, у тому числі каталаза. Як показали багато дослідників (Vinnychenko and Dolhova, 2001; Rosyichina et al., 2011; Wuytack et al., 2013; Seyyedneja et al., 2013; Wang et al., 2014; Rosyichina-Halycha et al., 2014), стійкі до стресорів рослини характеризуються підвищенням активності оксидоредуктаз за дії несприятливих умов, тоді як у чутливих рослин, як правило, спостерігається пригнічення активності цих ферментів. Разом із цим, вплив складних комплексів забруднювачів повітря, характерних для промислових зон України, практично не досліджений. У зв'язку з цим вивчено вплив комплексу сполук флуору, нітрогену та сульфуру на зміни активності каталази у листках деяких видів деревних і чагарникових рослин.

## Матеріал і методи досліджень

Як об'єкти досліджень використано десять видів деревних і чагарникових рослин, які відрізняються стійкістю до забруднення повітря: бирючина звичайна (*Ligustrum vulgare* L.), дуб звичайний (*Quercus robur* Sol.), жимолость татарська (*Lonicera tatarica* L.), маслинка вузьколиста (*Eleagnus angustifolia* L.), садовий жасмин звичайний (*Philadelphus coronaria* L.) – стійкі види; гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.), тополя китайська (*Populus simonii* Carrière) – види зі змінною стійкістю; горобина звичайна (*Sorbus aucuparia* L.) та ясен ланцетний (*Fraxinus lanceolata* Borkh) – нестійкі види (Prysedskij, 2014). Вибір цих рослин зумовлений їх широким використанням у зеленому будівництві степової зони (Лура, 1977; Антиров, 1979). Пагони дослідних рослин довжиною 30–40 см зрізали в районах, що не піддаються хронічному забрудненню повітря, та розміщували у колби з водою. Після цього їх піддавали фумігації сумішами аміаку, флуориду гідрогену, сірчистого ангідриду та парів сірчаної кислоти за схемою повного дворівневого багатофакторного експерименту (табл. 1) у фумігаційній камері (Popov and Nehruc'ka, 1973). Контрольні пагони містилися в контрольному відсіку камери, газу на них не діяли.

Для визначення каталазної функції використано листки із середньої частини пагонів. Активність ферменту визначали йодометричним методом, заснованим на здатності каталази руйнувати пероксид водню (Воjко et al., 2014). Досліди проводили у десятиразовій повторності. Для з'ясування вірогідності впливу забруднення на активність каталази застосовували дисперсійний аналіз. Порівняння середніх здійснювали методом Дункана (Prysedskij, 1999). Обробку проводили за допомогою пакета статистичних програм, створених на кафедрі фізіології рослин ДонНУ (Prysedskij, 2005).

Таблиця 1

### Концентрації забруднювачів (мг/м<sup>3</sup>)

№ варіанта	NH <sub>3</sub>	HF	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	1,2	0,2	1,0	0,9
2	12,0	0,2	1,0	0,9
3	1,2	2,0	1,0	0,9
4	12,0	2,0	1,0	0,9
5	1,2	0,2	10,0	9,0
6	12,0	0,2	10,0	9,0
7	1,2	2,0	10,0	9,0
8	12,0	2,0	10,0	9,0

## Результати та їх обговорення

Забруднення повітря сумішами сполук флуору, сульфур та нітрогену спричинює вірогідні зміни активності каталази в усіх досліджуваних видів рослин. Характер змін залежить від чутливості рослин, складу та концентрацій поллютантів, терміну їх дії (табл. 2). У бирючини звичайної дія забруднювачів не викликає вірогідних змін активності каталази майже в усіх варіантах фумігації. Разом із цим, дія сполучення аміаку з флуоридом водню (варіант 4) викликає підвищення активності цього ферменту на 11–49% порівняно з контролем, а суміш кислих газів (HF + SO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, варіант 7) за п'ятигодинної дії збільшує активність каталази на 33%. У варіантах із високою концентрацією NH<sub>3</sub> (варіант 2) та флуору (варіант 3) спостерігається тенденція до підвищення функції каталазоної.

У дуба звичайного вірогідне підвищення каталазоної функції відбувається за дії високих концентрацій сірчистого ангідриду та парів сірчаної кислоти (варіанти 5 та 6). За цих умов активність ферменту становить 145–318% від контролю. Високі концентрації всіх поллютантів (варіант 8) за десятигодинної дії викликають зниження каталазоної активності на 24%. За всіх інших сполучень токсикантів вірогідних змін активності ферменту не виявлено.

Для жимолості татарської характерна відсутність вірогідної дії комплексу забруднювачів на активність каталази практично в усіх варіантах фумігації. Значуще підвищення активності ферменту спостерігали за дії низьких концентрацій суміші поллютантів (варіант 1) та за високих концентрацій сірчистого ангідриду та парів сірчаної кислоти (варіант 5). За цих умов активність каталази зростає у 1,3–1,9 раза порівняно з рослинами, яких не піддавали дії поллютантів. Високі концентрації сполук флуору, сульфур та нітрогену спричинюють зниження активності каталази на 34–37%. Слід зазначити, що пригнічення каталазоної функції збігається з появою незначних (до 10–15%) видимих пошкоджень листових пластинок.

Таблиця 2

## Вплив забруднення повітря на активність каталази в листі деревних і чагарникових рослин (n = 10)

№ варіанта	Термін фумігації, год.	Активність каталази, мкМоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /г·хв			
		M ± m	різниця (D)	допуск Дункана (D <sup>DK</sup> )	% до кон троллю
1	2	3	4	5	6
Стайкі види					
Бирючина звичайна ( <i>Ligustrum vulgare</i> L.)					
1	контроль	18,598 ± 2,189	–	–	100,00
	5	15,406 ± 1,746	–3,192	4,790	82,84
	10	18,433 ± 2,077	–0,165	4,033	99,11
2	контроль	18,027 ± 1,902	–	–	100,00
	5	19,252 ± 1,257	–1,225	4,397	106,80
	10	12,136 ± 1,297	–5,891*	4,790	67,32
3	контроль	16,500 ± 1,046	–	–	100,00
	5	16,893 ± 1,458	–0,393	4,033	102,38
	10	13,389 ± 1,345	–3,111	4,790	81,15
4	контроль	15,767 ± 1,157	–	–	100,00
	5	17,571 ± 1,159	–1,804	4,499	111,44
	10	23,352 ± 2,082	7,585*	4,790	148,11
5	контроль	22,114 ± 1,524	–	–	100,00
	5	20,118 ± 2,078	–1,996	4,252	90,97
	10	15,551 ± 1,672	–6,563*	4,790	70,32

6	контроль	13,910 ± 1,087	–	–	100,00
	5	13,540 ± 1,383	–0,370	4,033	97,34
	10	14,518 ± 1,028	–0,608	4,252	104,37
7	контроль	15,473 ± 1,168	–	–	100,00
	5	20,641 ± 1,057	5,168*	4,790	133,40
	10	16,108 ± 1,695	–0,635	4,397	104,10
8	контроль	15,452 ± 1,068	–	–	100,00
	5	14,332 ± 1,554	–1,120	4,499	92,75
	10	14,750 ± 1,720	–0,702	4,252	95,46
Дуб звичайний ( <i>Quercus robur</i> Sol.)					
1	контроль	21,119 ± 0,642	–	–	100,00
	5	17,981 ± 1,608	–3,138	4,394	85,14
	10	19,857 ± 2,019	–1,262	4,300	94,02
2	контроль	21,742 ± 0,875	–	–	100,00
	5	23,476 ± 1,353	1,734	3,936	107,98
	10	20,499 ± 1,096	–1,243	4,246	94,28
3	контроль	20,876 ± 2,568	–	–	100,00
	5	20,841 ± 1,071	–0,035	3,734	99,83
	10	18,813 ± 1,453	–2,063	4,246	90,12
4	контроль	15,355 ± 1,106	–	–	100,00
	5	12,890 ± 0,867	–2,465	4,071	83,95
	10	10,555 ± 0,819	–4,800*	4,165	68,74
5	контроль	14,420 ± 0,985	–	–	100,00
	5	20,898 ± 1,054	6,478*	4,434	144,92
	10	45,782 ± 1,835	31,362*	4,434	317,49
6	контроль	14,798 ± 1,655	–	–	100,00
	5	25,982 ± 0,931	11,184*	4,434	175,58
	10	17,477 ± 1,109	2,679	4,071	118,10
7	контроль	24,546 ± 1,049	–	–	100,00
	5	31,509 ± 1,808	–6,963*	4,071	128,37
	10	29,246 ± 2,147	–4,700	3,936	119,15
8	контроль	22,385 ± 1,244	–	–	100,00
	5	19,867 ± 1,637	–2,518	4,354	88,75
	10	17,028 ± 1,261	–5,357*	4,434	76,07
Жимолость татарська ( <i>Lonicera tatarica</i> L.)					
1	контроль	17,242 ± 1,445	–	–	100,00
	5	22,789 ± 1,143	5,547*	4,803	132,17
	10	32,295 ± 2,043	15,053*	4,803	187,30
2	контроль	20,739 ± 1,485	–	–	100,00
	5	18,468 ± 1,088	–2,271	4,409	89,05
	10	16,094 ± 0,913	–4,645	4,657	77,60
3	контроль	21,785 ± 0,791	–	–	100,00
	5	21,887 ± 1,591	0,102	4,044	100,47
	10	15,908 ± 1,583	–5,877*	4,803	73,02
4	контроль	21,552 ± 1,944	–	–	100,00
	5	19,709 ± 0,775	–1,843	4,263	91,45
	10	17,857 ± 1,696	–3,695	4,598	82,86
5	контроль	21,553 ± 1,075	–	–	100,00
	5	27,406 ± 1,484	5,853*	4,715	127,16
	10	40,072 ± 1,683	18,519*	4,803	185,92
6	контроль	23,899 ± 1,599	–	–	100,00
	5	34,908 ± 1,737	11,009*	4,511	146,06
	10	15,359 ± 1,160	–8,540*	4,803	64,27
7	контроль	18,991 ± 1,317	–	–	100,00
	5	22,570 ± 1,993	3,579	4,715	118,85
	10	27,822 ± 1,436	8,831*	4,803	146,50
8	контроль	23,032 ± 1,339	–	–	100,00
	5	15,323 ± 2,012	–7,709*	4,803	66,53
	10	14,288 ± 2,325	–8,744*	4,803	62,04
Маслинка вузьколиста ( <i>Eleagnus angustifolia</i> L.)					
1	контроль	60,212 ± 2,346	–	–	100,00
	5	68,159 ± 2,822	7,947*	5,719	113,20
	10	71,428 ± 1,022	11,216*	5,719	118,63
2	контроль	66,916 ± 1,043	–	–	100,00
	5	75,781 ± 1,739	8,865*	5,667	113,25
	10	88,140 ± 1,828	21,224*	5,719	131,72
3	контроль	63,752 ± 2,232	–	–	100,00
	5	60,538 ± 2,799	–3,214	5,076	94,96

1	2	3	4	5	6
	10	43,761 ± 1,040	-19,991*	5,719	68,64
4	контроль	73,342 ± 1,345			100,00
	5	57,066 ± 1,761	-16,276*	5,719	77,81
	10	60,025 ± 1,166	-13,317*	5,719	81,84
5	контроль	57,856 ± 1,630			100,00
	5	61,776 ± 1,396	3,920	5,476	106,78
	10	51,044 ± 1,347	-6,812*	5,250	88,23
6	контроль	67,130 ± 1,411			100,00
	5	68,709 ± 1,398	1,579	5,372	102,35
	10	83,956 ± 2,171	16,826*	5,667	125,06
7	контроль	65,503 ± 1,726			100,00
	5	65,603 ± 1,867	-0,100	4,815	100,15
	10	60,142 ± 1,198	-5,361	5,476	91,81
8	контроль	68,132 ± 2,763			100,00
	5	68,236 ± 1,264	-0,104	5,076	100,15
	10	53,751 ± 2,499	-14,381*	5,719	78,89
Садовий жасмин звичайний ( <i>Philadelphus coronaria</i> L.)					
1	контроль	45,813 ± 0,968			100,00
	5	38,621 ± 1,415	-7,192*	6,052	84,30
	10	40,648 ± 2,517	-5,165	5,922	88,73
2	контроль	50,156 ± 1,260			100,00
	5	38,806 ± 1,947	-11,350*	6,107	77,37
	10	26,993 ± 2,111	-23,163*	6,107	53,82
3	контроль	45,407 ± 1,950			100,00
	5	32,861 ± 1,428	-12,546*	6,052	72,37
	10	31,528 ± 2,007	-13,879*	6,107	69,43
4	контроль	50,679 ± 2,470			100,00
	5	55,831 ± 1,108	-5,152*	5,142	110,17
	10	42,365 ± 1,842	-8,314*	6,107	83,59
5	контроль	59,010 ± 2,025			100,00
	5	43,354 ± 2,010	-15,656*	6,107	73,47
	10	46,591 ± 2,447	-12,419*	6,107	78,95
6	контроль	48,827 ± 1,923			100,00
	5	65,959 ± 2,587	17,132*	6,052	135,09
	10	56,417 ± 2,361	7,590*	5,922	115,54
7	контроль	44,765 ± 1,851			100,00
	5	50,014 ± 1,006	5,249	5,996	111,73
	10	79,920 ± 2,457	35,155*	6,107	178,53
8	контроль	49,518 ± 2,760			100,00
	5	42,817 ± 1,018	-6,701	6,052	86,47
	10	47,429 ± 1,723	-2,089	5,421	95,78
Види із змінною стійкістю					
Гірकोкаштан звичайний ( <i>Aesculus hippocastanum</i> L.)					
1	контроль	15,850 ± 1,653			100,00
	5	32,940 ± 1,292	17,090*	4,297	207,82
	10	14,039 ± 0,462	-1,811	3,944	88,57
2	контроль	22,423 ± 1,148			100,00
	5	18,768 ± 1,456	-3,655	4,114	83,70
	10	20,218 ± 0,965	-2,205	3,944	90,17
3	контроль	20,477 ± 1,550			100,00
	5	17,710 ± 1,795	-2,767	4,114	86,49
	10	18,626 ± 1,660	-1,851	4,036	90,96
4	контроль	22,888 ± 1,889			100,00
	5	14,753 ± 1,087	-8,135*	4,297	64,46
	10	9,736 ± 0,582	-13,152*	4,297	42,54
5	контроль	26,829 ± 1,355			100,00
	5	20,097 ± 1,652	-6,732*	4,258	74,91
	10	22,714 ± 1,162	-4,115	3,944	84,66
6	контроль	23,516 ± 1,470			100,00
	5	41,754 ± 1,472	18,238*	4,166	177,56
	10	21,906 ± 2,357	-1,610	4,036	93,15
7	контроль	16,978 ± 1,236			100,00
	5	30,488 ± 1,225	13,510*	4,297	179,57
	10	33,998 ± 1,230	17,020*	4,297	200,25
8	контроль	27,003 ± 1,193			100,00
	5	15,506 ± 0,913	-11,497*	4,297	57,42
	10	9,436 ± 0,664	-17,567*	4,297	34,94

1	2	3	4	5	6
Клен ясенелистий ( <i>Acer negundo</i> L.)					
1	контроль	101,056 ± 3,170			100,00
	5	50,874 ± 3,483	-50,182*	11,015	50,34
	10	48,956 ± 4,456	-52,100*	11,015	48,44
2	контроль	94,278 ± 3,932			100,00
	5	89,537 ± 2,525	-4,741	10,546	94,97
	10	67,666 ± 1,829	-26,612*	11,015	71,77
3	контроль	103,593 ± 2,876			100,00
	5	70,380 ± 2,193	-33,213*	11,015	67,94
	10	61,005 ± 2,492	-42,588*	11,015	58,89
4	контроль	103,137 ± 3,221			100,00
	5	93,042 ± 9,779	-10,095	10,546	90,21
	10	73,238 ± 2,365	-29,899	11,015	71,01
5	контроль	106,236 ± 3,867			100,00
	5	92,135 ± 3,412	-14,101*	10,914	86,73
	10	94,445 ± 3,713	-11,791*	10,345	88,90
6	контроль	89,177 ± 3,769			100,00
	5	68,140 ± 1,963	-21,037*	10,546	76,41
	10	37,810 ± 1,683	-51,367*	11,015	42,40
7	контроль	93,226 ± 3,389			100,00
	5	54,101 ± 1,921	-39,125*	11,015	58,03
	10	58,738 ± 1,670	-34,488*	11,015	63,01
8	контроль	91,351 ± 2,273			100,00
	5	79,367 ± 1,739	-11,984*	10,111	86,88
	10	73,911 ± 3,657	-17,440*	10,345	80,91
Тополя китайська ( <i>Populus simonii</i> Carrière)					
1	контроль	75,147 ± 1,605			100,00
	5	68,242 ± 1,704	-6,905	7,430	90,81
	10	57,089 ± 1,928	-18,058*	8,020*	75,97
2	контроль	95,037 ± 2,200			100,00
	5	125,149 ± 3,331	30,112*	7,750	131,68
	10	65,224 ± 1,477	-29,813*	8,094	68,63
3	контроль	83,885 ± 3,831			100,00
	5	118,690 ± 3,624	34,805*	8,094	141,49
	10	94,533 ± 2,632	10,648*	7,602	112,69
4	контроль	72,619 ± 1,289			100,00
	5	60,477 ± 1,925	-12,142*	7,750	83,28
	10	64,447 ± 2,494	-8,172*	7,602	88,75
5	контроль	80,498 ± 2,948			100,00
	5	70,212 ± 1,911	-10,286*	7,430	87,22
	10	53,706 ± 2,635	-26,792*	8,094	66,72
6	контроль	90,695 ± 3,297			100,00
	5	107,016 ± 3,025	16,321*	7,848	118,00
	10	132,101 ± 4,331	41,406*	8,094	145,65
7	контроль	97,060 ± 1,889			100,00
	5	105,599 ± 1,657	8,539*	6,815	108,80
	10	90,479 ± 3,448	-6,581	7,750	93,22
8	контроль	91,538 ± 2,514			100,00
	5	60,354 ± 0,983	-31,184*	8,094	65,93
	10	49,154 ± 2,052	-42,384*	8,094	53,70
Нестійкі види					
Горобина звичайна ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)					
1	контроль	127,585 ± 4,620			100,00
	5	75,941 ± 3,749	-51,644*	12,055	59,52
	10	49,279 ± 1,682	-78,306*	12,055	38,62
2	контроль	114,600 ± 3,538			100,00
	5	91,714 ± 2,411	-22,886*	11,542	80,03
	10	50,500 ± 1,981	-64,100*	12,055	44,07
3	контроль	122,492 ± 4,110			100,00
	5	78,620 ± 2,515	-43,872*	12,055	64,18
	10	42,811 ± 1,801	-79,681*	12,055	34,95
4	контроль	94,089 ± 3,161			100,00
	5	49,704 ± 1,460	-44,385*	12,055	52,83
	10	59,952 ± 2,275	-34,137*	11,945	63,72
5	контроль	120,818 ± 13,506			100,00
	5	96,973 ± 2,008	-23,845*	11,542	80,26
	10	53,717 ± 2,995	-67,101*	12,055	44,46

1	2	3	4	5	6
6	контроль	120,048 ± 2,926	–	–	100,00
	5	82,581 ± 2,166	–37,467*	11,945	68,79
	10	31,687 ± 1,572	–88,361*	12,055	26,40
7	контроль	105,584 ± 4,115	–	–	100,00
	5	89,784 ± 2,819	–15,800*	11,542	85,04
	10	69,329 ± 1,620	–36,255*	12,055	65,66
8	контроль	101,828 ± 2,163	–	–	100,00
	5	81,909 ± 2,593	–19,919*	11,688	80,44
	10	50,415 ± 1,924	–51,413*	12,055	49,51
Ясен ланцетний ( <i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh)					
1	контроль	68,585 ± 1,688	–	–	100,00
	5	54,806 ± 2,840	–13,779*	5,650	79,91
	10	32,316 ± 2,054	–36,269*	5,828	47,12
2	контроль	58,626 ± 1,350	–	–	100,00
	5	26,942 ± 1,116	–31,684*	5,828	45,96
	10	32,619 ± 0,932	–26,007*	5,580	55,64
3	контроль	74,360 ± 2,492	–	–	100,00
	5	73,265 ± 2,047	–1,095	4,906	98,53
	10	44,879 ± 0,755	–29,481*	5,828	60,35
4	контроль	70,041 ± 2,479	–	–	100,00
	5	59,390 ± 1,308	–10,651*	5,580	84,79
	10	43,876 ± 1,315	–26,165*	5,828	62,64
5	контроль	80,024 ± 3,692	–	–	100,00
	5	64,640 ± 1,387	–15,384*	5,828	80,78
	10	65,115 ± 1,164	–14,909*	5,774	81,37
6	контроль	71,576 ± 2,997	–	–	100,00
	5	59,685 ± 1,450	–11,891*	5,580	83,39
	10	16,698 ± 1,206	–54,878*	5,828	23,33
7	контроль	74,711 ± 1,616	–	–	100,00
	5	37,947 ± 1,150	–36,764*	5,828	50,79
	10	28,709 ± 1,360	–46,002*	5,828	38,43
8	контроль	72,126 ± 2,151	–	–	100,00
	5	30,065 ± 1,649	–42,061*	5,828	41,68
	10	27,541 ± 1,210	–44,585*	5,828	38,18

Примітка: \* – різниця між середніми визнається вірогідною на рівні значущості  $P < 0,05$ , якщо обчислене значення (D) дорівнює або перевищує за абсолютною величиною допуск (DDk).

У маслинка вузьколистий вірогідне підвищення активності каталази відбувається за дії сумішей низьких концентрацій забруднювачів (варіант 1) і сумішей, що містять підвищені концентрації аміаку (варіанти 2, 6), тоді як підвищені концентрації кислих газів спричинюють незначне (12–19%) зниження активності ферменту. Найбільший негативний ефект спричинює десятигодинна дія комплексу високих концентрацій поллютантів, за якої каталазна активність знижується на 21% порівняно з нефумігованими рослинами.

Садовий жасмин звичайний характеризується відсутністю вірогідних змін або незначними змінами активності за п'ятигодинної дії поллютантів. Разом із цим, десятигодинна дія аміаку (варіант 2) знижує ферментативну активність на 46%, а дія кислих газів (варіанти 6, 7), навпаки, викликає підвищення активності цього ферменту на 12–79% порівняно з контрольними рослинами. Суміш із високими концентраціями забруднювачів не викликає змін активності каталази.

Таким чином, для стійких і малопошкоджуваних видів деревних і чагарникових рослин характерна відсутність вірогідних змін активності каталази, хоча у бирючини звичайної, дуба звичайного та маслинка вузьколистий спостерігається тенденція до підвищення каталазної функції за дії забруднювачів, а у жимолості татарської та садового жасмину звичайного – тенденція до її зниження. Такі закономірності змін активності

ферменту можуть свідчити про варіації стійкості досліджених видів та різницю механізмів детоксикації забруднювачів, оскільки ці види характеризувалися відсутністю видимих пошкоджень у всіх варіантах фумігації або некрози не перевищували 5% загальної поверхні листків.

Для видів зі змінною стійкістю характерний значний вплив комплексу забруднювачів на активність каталази. У гірकोкаштан звичайного спостерігається значуще підвищення активності ферменту за дії низьких рівнів забруднення, тоді як підвищення концентрації суміші аміаку ( $12 \text{ мг/м}^3$ ) та флуориду водню ( $2 \text{ мл/м}^3$ ) спричинює зниження активності каталази до 25–65% відповідно до терміну обробки. Разом із цим підвищені концентрації аміаку або фтористого водню, які діють окремо, не впливають вірогідно на каталазну функцію. Високі концентрації комплексу всіх забруднювачів викликають пригнічення діяльності ферменту до 43–65% порівняно з рослинами, які не піддавалися дії поллютантів.

У клена ясенелистого спостерігається зниження активності каталази за дії забруднювачів на низькому рівні на 49–52% порівняно з контролем, тоді як підвищені концентрації аміаку за п'ятигодинної дії не впливають на активність каталази. Високі концентрації сірчаного газу та сірчаної кислоти вірогідно інактивують фермент і спричинюють зниження його активності до 20–58%, а підвищені концентрації кислих газів (варіант 7) викликають зниження активності ферменту на 37–42% порівняно з нефумігованими рослинами. За дії суміші високих концентрацій поллютантів активність ферменту знижується значно слабше та становить 81–87% від рівня контролю. Таке явище можна пояснити ймовірно хімічною нейтралізацією поллютантів.

Відповідь тополі китайської характеризується відсутністю вірогідних змін активності ферменту за низьких рівнів забруднення. Високі концентрації аміаку та флуориду водню викликають підвищення активності ферменту через п'ять годин фумігації на 32–42%. Збільшення терміну фумігації рослин цими газами знижує каталазну функцію. За дії підвищеного вмісту в повітрі сумішей сірчаного ангідриду з аміаком (варіант 6) спостерігається підвищення активності каталази порівняно з контрольними рослинами у 1,2–1,5 рази. Комплекс поллютантів на високому рівні (варіант 8), навпаки, послаблює каталазну функцію на 34–46%.

Слід зазначити, що в усіх видів зі змінною стійкістю забруднення повітря зумовлює підвищення активності каталази або не викликає вірогідних змін цього показника за відсутності видимих пошкоджень. У пошкодженому листі спостерігається зниження каталазної функції.

У нестійких видів рослин забруднення атмосфери сполуками фтору, сірки та азоту в більшості варіантів зумовлює зниження активності каталази. У горобини звичайної п'ятигодинна дія комплексу забруднювачів на низькому рівні ( $\text{HF} - 0,2 \text{ мл/м}^3$ ,  $\text{NH}_3 - 1,2 \text{ мл/м}^3$ ,  $\text{SO}_2 - 0,9$  та  $\text{H}_2\text{SO}_4 - 1,0 \text{ мл/м}^3$ ) пригнічує активність каталази на 41%, десятигодинна дія – на 61% порівняно з контрольними рослинами. За підвищених концентрацій фтористого водню (варіант 3) каталазна функція знижується на 20–61% залежно від терміну їх фумігації. Сірчистий газ і пари сірчаної кислоти також викликають значне пригнічення каталазної функції, яка у варіанті 5

становить 45% від рівня контрольних рослин. Слід також зазначити, що тривалість обробки суттєво впливає на зміни каталазної функції. Збільшення часу фумігації в усіх варіантах забруднення підсилює негативну дію поллютантів.

Дія забруднювачів на активність каталази в ясена ланцетного за всіх варіантів дії поллютантів спричинює зниження функції цього ферменту на 20–77% порівняно з нефумігованими рослинами. Як і у горобини звичайної, збільшення терміну фумігації до десяти годин підсилює зниження активності ферменту. Найсуттєвіше впливають комплекси кислих газів (HF, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Таким чином, у нестійких до забруднення повітря видів рослин у відповідь на дію фітотоксикантів активність каталази значно знижується. Зниження активності ферменту залежить від ступеня пошкодження листкових пластинок.

Аналогічні закономірності встановили також інші дослідники за дії поллютантів на деревні (Ghorbanli et al., 2007; Koffi et al., 2015; Alexeyeva et al., 2016; Lykholat, 2016) та трав'янисті (Kim et al., 2007; Rossykhina-Halycha et al., 2013) рослини. Ми не виявили залежності між активністю каталази та газостійкістю вивчених нами видів рослин. Хоча можна зазначити, що нестійкі види (горобина звичайна та ясен ланцетний) мали вищий рівень активності ферменту (60–120 мкМоль/г·хв), ніж стійкі (15–60 мкМоль/г·хв).

## Висновки

Забруднення повітря комплексом сполук флуору, сульфору та нітрогену викликає вірогідні зміни активності каталази, які залежать від концентрації токсикантів, їх складу, часу експозиції та чутливості рослин. Стійкі до поллютантів види характеризуються підвищенням активності каталази у відповідь на дію забруднювачів, тоді як види зі змінною стійкістю неоднозначно реагують на вплив токсикантів. За збільшення концентрації забруднювачів і терміну обробки активність каталази в листках цих рослин знижується. У нестійких видів відбувається значне зниження активності каталази, яке залежить від терміну дії фітотоксикантів на рослини.

Таким чином, за відсутності у вивчених нами видів рослин видимих пошкоджень активність ферменту або не змінюється або підвищується порівняно з контрольними рослинами. Утворення некрозів знижує каталазну функцію. Встановлені закономірності зміни активності каталази свідчать про важливу роль ферменту у детоксикації поллютантів та підтриманні гомеостазу рослинного організму за несприятливих умов.

## Бібліографічні посилання

Antipov, V.G., 1979. Ustojchivost' drevesnykh rastenij k promyshlennym gazam [Stability of woody plants for industrial gases]. Nauka i Tekhnika, Minsk (in Russian).  
Bergmaqn, E., Bender, J., Weigel, H.-J., 1999. Ozone threshold doses and exposure-response relationships for the development of ozone injury symptoms in wild plant species. *New Phytol.* 144(3), 423–435.

Bobyliov, Y.P., Brygadyrenko, V.V., Bulakhov, V.L., Gaichenko, V.A., Gasso, V.Y., Didukh, Y.P., Ivashov, A.V., Kucheriavyi, V.P., Maliovanyi, M.S., Mytsyk, L.P., Pakhomov, O.Y., Tsaryk, I.V., Shabanov, D.A., 2014. *Ekologija* [Ecology]. Folio, Kharkiv (in Ukrainian).  
Bojko, M.I., Pryseds'kyj, J.H., Vjetrova, O.V., 2014. Velykyj praktykum z fiziologii ta biochimiji roslyn (bilky, fermenty, vitaminy, nuklejinovi kysloty) [Large workshop of plant physiology and biochemistry (proteins, enzymes, vitamins, nucleic acids)]. DonNU, Donec'k (in Ukrainian).  
Brygadyrenko, V., Ivanyshyn, V., 2015. Changes in the body mass of *Megaphyllum kievense* (Diplopoda, Julidae) and the granulometric composition of leaf litter subject to different concentrations of copper. *J. Forest Sci.* 61(9), 369–376.  
Cape, J.N., Pety, K.E., 1993. Environmental influences on the development of spruce needle cuticles. *New Phytol.* 125, 787–799.  
Czegey, G., Matai, A., Hide, E., 2016. UV-B effects on leaves – Oxidative stress and acclimation in controlled environments. *Plant Sci.* 248, 57–63.  
Dizengremel, P., 2001. Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees. *Plant Physiol. Biochem.* 39(9), 729–742.  
Durga, M., Bharathi, S., Balakrishna Murthy, P., Devasena, T., 2015. Characterization and phytotoxicity studies of suspended particulate matter (SPM) in Chennai urban area. *J. Envir. Biol.* 36(3), 583–589.  
Frei, M., Wissuwa, M., Pariasca-Tanaka, J., Chen, C.P., Sudekum, K.-H., Kohno, Y., 2012. Leaf ascorbic acid level – Is it really important for ozone tolerance in rice? *Plant Physiol. Biochem.* 59, 63–70.  
Ganatsasa, P., Tsakalidimia, M., Zachariadis, G., 2013. Effect of air traffic pollution on seed quality characteristics of *Pinus brutia*. *Environ. Exp. Bot.* 74, 157–161.  
Ghorbanli, M., Bakand, Z., Bakhshikhaniki, G., Bakand, S., 2007. Air pollution effects on the activity of antioxidant enzymes in *Nerium oleander* and *Robinia pseudoacacia* plants in Teheran. *J. Environ. Health Sci. Eng.* 4, 148–156.  
Il'kun, G.M., 1971. Gazoustojchivost' rastenij [Gas resistant of plants]. *Naukova Dumka, Kyiv* (in Russian).  
Il'kun, G.M., 1978. Zagryazniteli atmosfery i rasteniya [Atmospheric pollutants and plants]. *Naukova Dumka, Kyiv* (in Russian).  
Jing, L., Dombinov, V., Shen, S., Wu, Y., Yang, L., Wang, Y., Frei, M., 2016. Physiological and genotype-specific factors associated with grain quality changes in rice exposed to high ozone. *Environ. Pollut.* 210, 397–408.  
Kim, Y.-H., Lim, S., Han, S.-H., Lee, J.-C., Song, W.-K., Bang, J.-W., Kwon, S.-Y., Lee, H.-S., Kwak, S.-S., 2007. Differential expression of 10 sweetpotato peroxidases in response to sulfur dioxide, ozone, and ultraviolet radiation. *Plant Physiol. Biochem.* 45(12), 908–914.  
Klumpp, G., Furlan, C.M., Domingos, M., Klumpp, A., 2000. Response of stress indicators and growth parameters of *Tibouchina pulchra* Cogn. exposed to air and soil pollution near the industrial complex of Cubatao, Brazil. *Sci. Total Environ.* 246(1), 79–91.  
Koffi, N.A., Maxime, A.D., Barima, Y.S.S., Dongui, B., 2015. Detoxifying hydrogen peroxide enzymes activity in two plant species exposed to air pollution in Abidjan city (Cote D'ivoire). *Int. J. Plant Anim. Environ. Sci.* 5(1), 140–145.  
Langebartels, C., Wohlgenuth, H., Kschieschan, S., Grun, S., Sandermann, H., 2002. Oxidative burst and cell death in ozone-exposed plants. *Plant Physiol. Biochem.* 40(6), 567–575.  
Luma, G.B., Shelpa, B.J., Dell, J.R., Bozzo, G.G., 2016. Oxidative metabolism is associated with physiological disorders in fruits stored under multiple environmental stresses. *Plant Sci.* 245, 143–152.  
Lykholat, Y., Khromyk, N., Ivan'ko, I., Kovalenko, I., Shupravnova, L., Kharytonov, M., 2016. Metabolic responses of

- steppe forest trees to altitude-associated local environmental changes. *Agriculture and Forestry* 62(2), 163–171.
- Lykholat, Y.V., Khromykh, N.O., Kovalenko, I.M., Boroday, E.S., 2016. The impact of pollutants on the antioxidant protection of species of the genus *Tilia* at different developmental stages. *Visn. Dnipropetr. Univ. Ser. Biol. Ekol.* 24(1), 188–192.
- Lypa, A.L., 1977. *Dendrolohyja z osnovamy aklimatyzaciji* [Dendrology with the basics of acclimatization]. Vyssha Shkola, Kyiv (in Ukrainian).
- Mandal, M., 2006. Physiological changes in certain test plants under automobile exhaust pollution. *J. Environ. Biol.* 27(1), 43–47.
- Olszyk, D.M., Takemoto, B.K., Poe, M., 1991. Leaf photosynthetic and water relations responses for “Valencia” orange trees exposed to oxidant air pollution. *Environ. Exp. Bot.* 31(4), 427–436.
- Pack, M.R., 1971. Effects of hydrogen fluoride on bean reproduction. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* 21(3), 133–137.
- Pertti, R., 2001. Changes in urban lichen diversity after a fall in sulphur dioxide levels in the city of Tampere, SW Finland. *Ann. Bot. Fenn.* 38(4), 295–304.
- Popov, V.A., Nehruc’ka, H.M., 1973. Metod shtuchoji fumihaciji roslin shkidlyvymy hazamy v toci povitryja [Fumigation method of artificial plants harmful gases in the air flow]. *Introdukcija ta Eksperymental’na Ekologija Roslyn* 3, 83–88 (in Ukrainian).
- Pryeds’kyj, J.H., 1999. *Statystychna obrobka rezul’tativ biolohichnykh eksperymentiv* [Statistical analysis of the results of biological experiments]. Juho-Vostok, Doneck (in Ukrainian).
- Pryeds’kyj, J.H., 2005. *Paket prohram dlja provedennja statystychnoji obrobky rezul’tativ biolohichnykh eksperymentiv* [The software package for the statistical analysis of the results of biological experiments]. DonNU, Donec’k (in Ukrainian).
- Pryeds’kyj, J.H., 2014. *Charakterystyka stijkosti derevnych ta chahamykovykh roslin do zabrudnennja povitryja spolukamy sirky, floru ta nitrohenu* [Resistance of wood and shrubby plants to air pollution by sulfur, fluorine and nitrogen compounds]. *Visn. Charkiv. Univ. Ser. Biol.* 21, 162–167 (in Ukrainian).
- Rossychnina, H., Lykholat, J., Kyrpyta, L., 2011. *Aktyvnist’ fermentiv-detoksykatoriv aktyvnykh form kysnju hazonoutvorjuchykh trav za kompleksnoji diji toksykantiv* [Activity of enzymes-detoxycators of active oxygen species of lawn forming grasses at complex toxic action]. *Visn. Lviv Univ. Ser. Biol.* 56, 239–244 (in Ukrainian).
- Rossychnina-Halycha, H.S., Lykholat, J.V., Lysenko, N.O., 2014. *Funkcionuvannja fermentiv antyoksydantnoji systemy v reproduktyvnykh orhanach Robinia pseudoacacia L. za umov promyslovoho mista* [The functioning of antioxidant system enzymes in the reproductive organs of *Robinia pseudoacacia* L. in conditions of industrial city]. *Pytannja Stepovoho Lisoznavstva ta Lisovoji Rekul’tyvaciji Zemel* 43, 45–49 (in Ukrainian).
- Rossychnina-Halycha, H.S., Lykholat, Y.V., Vinnychenko, O.M., 2013. *Komponenty antyoksydantnoji systemy zakhystu yak pokaznyky stijkosti travianystykh roslin, shcho zrostaiut u botanichnomu sadu DNU* [The components of the antioxidant defense system as indicators of sustainability herb that grow in the botanical garden of DNU]. *Visti Biosferneho Zapovidnyka Askaniia-Nova.* 15, 188–194 (in Ukrainian).
- Seyyednejad, S.M., Koochak, H., Vaezi, J., 2013. Changes in anti-oxidative enzymes activity, protein content and ascorbic acid level in *Prosopis juliflora* exposed to industrial air pollution. *Journal of Biology and Today’s World* 10, 482–492.
- Sharma, G.K., Chander, C., Salemi, L., 1980. Environmental pollution and leaf cuticular variation in kudzu (*Pueraria lobata* Willd.). *Ann. Bot.* 45(1), 77–80.
- Soda, C., Bussotti, F., Grossoni, P., Barnes, J., Mori, B., Tani, C., 2000. Impacts of urban levels of ozone on *Pinus halepensis* foliage. *Environ. Exp. Bot.* 44(1), 69–82.
- Sutinen, M.-L., Ratio, H., Nivala, V., Olikainen, R., Ritarp, A., 1996. Effects of emissions from copper-nickel smelters on the frost hardiness of *Pinus sylvestris* needles in the subarctic region. *New Phytol.* 132, 503–512.
- Vinnychenko, O.M., Dolhova, L.H., 2001. *Ekofiziolohichni problemy fitocenoziv ta biolohichna aktyvnist’ edafotopiv v umovach technohennykh terytorij* [Ecophysiological problems of phytocenoses and soil biological activity in terms of man-made areas]. *Fiziolohija Roslyn v Ukrajinі na mezhi tysjacholit’*, 2, 23–36 (in Ukrainian).
- Wang, J., Zeng, Q., Zhu, J., Chen, C., Liu, G., Tang, H., 2014. Apoplastic antioxidant enzyme responses to chronic free-air ozone exposure in two different ozone-sensitive wheat cultivars. *Plant Physiol. Biochem.* 82, 183–193.
- Wuytack, T., Abdelgawad, H., Staelens, J., Asard, H., Boeckx, P., Verheyen, K., Samson, R., 2013. The response of the foliar antioxidant system and stable isotopes (<sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N) of white willow to low-level air pollution. *Plant Physiol. Biochem.* 67, 154–161.

Надійшла до редколегії 05.08.2016