

УДК 630*181:633.877.3:632.15

ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ХВОЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В УСЛОВИЯХ УРБАНИЗАЦИИ

Колтунов Е.В.

ФГБУН Ботанический сад Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург,
e-mail: evg_koltunov@mail.ru

Изучено влияние аэротехногенного загрязнения на состав и содержание фенольных соединений в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) вблизи городских автомагистралей с интенсивным потоком автотранспорта. Состав и содержание соединений изучали методом градиентной жидкостной хроматографии. Несмотря на значительный интерес к исследованию биохимических аспектов взаимоотношений в системе: «аэротехногенное загрязнение – сосна обыкновенная – фенольные соединения», многие аспекты остаются недостаточно изученными, а полученные результаты – противоречивыми. Как показали результаты, аэротехногенное загрязнение вызывает разнонаправленные реакции низкомолекулярных химических соединений в клетках хвои сосны обыкновенной. Преобладает реакция снижения содержания химических соединений в хвое. В составе этой подгруппы было 47,17% от всех химических соединений. Возрастание содержания химических соединений отмечалось у 28,3%, отсутствие реакции – у 24,53%. У идентифицированным химических соединений (у 56%) содержание также заметно снижается в условиях аэротехногенного загрязнения, по сравнению с контролем, у 32% соединений возрастает, у 12% – не изменяется. В составе первой подгруппы были в одинаковом количестве флавоноиды и гидроксикоричные кислоты (по 35,7%). Полученные нами результаты показали, что у 75% флавоноидов преобладающей реакцией в хвое сосны обыкновенной в условиях загрязнения вблизи автомагистралей является возрастание их содержания. Это: рутин, лутеолин, кверцетин, изорамнетин, апигенин, кемпферол. Это обусловлено высоким уровнем антиоксидантной и антирадикальной активности флавоноидов и активной реакцией на воздействие факторов среды (аэротехногенное загрязнение), а также – сформировавшимся в динамике эволюции вида уровнем, типом и характером реакции на стресс. Важную роль выполняет и стратегия адаптации к изменению условий среды.

Ключевые слова: аэротехногенное загрязнение, фенольные соединения, хвоя сосны обыкновенной, городские автомагистрали

EFFECT OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION UPON COMPOSITION AND CONTENT OF PHENOLIC COMPOUNDS IN THE NEEDLE OF *PINUS SYLVESTRIS* L. IN TERMS OF URBANIZATION

Koltunov E.V.

Federal State Budgetary Institution of Science Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, e-mail: evg_koltunov@mail.ru

Effect of aerotechnogenic pollution upon composition and content of phenolic compounds in pine needles of *Pinus sylvestris* L. near urban highways with heavy traffic has been studied. The composition and content of the compounds was studied by gradient liquid chromatography. Despite the considerable interest in the study of biochemical aspects of relationships in the system: «aerotechnogenic pollution – *Pinus sylvestris* – phenolic compounds», many aspects remain insufficiently studied, and the results obtained are contradictory. According to the results, aerotechnogenic pollution causes multidirectional reactions of low molecular weight chemical compounds in cells of the *Pinus sylvestris* needles. Mostly the reaction is reduction in content of chemical compounds in the needles. The composition of this subgroup formed 47.17% of all chemical compounds. An increase in content of chemical compounds was registered among 28.3% of the compounds, the absence of reaction – among 24.53%. In chemical compounds, identified by us (56%), the content also decreased noticeably under conditions of aerotechnogenic pollution, in comparison to the control, 32% of the compounds increased, and 12% did not change. In the first subgroup, flavonoids and hydroxycinnamic acids were in the same amount (for 35.7%). Our results showed that in 75% of flavonoids, the prevailing reaction in the needles of *Pinus sylvestris* under conditions of aerotechnogenic pollution near highways is an increase in their content. These are: rutin, luteolin, quercetin, isoramnetin, apigenin, kaempferol. This took place due to the high level of antioxidant and antiradical activity of flavonoids and their active reaction to environmental factors (aerotechnogenic pollution), as well as the level, formed in the dynamics of evolution of a type, nature of stress response. An important role is played by the strategy of adapting to changing environmental conditions.

Keywords: aerotechnogenic pollution, phenolic compounds, pine needles, urban highways

Уровень и масштабы техногенного загрязнения городских лесонасаждений, особенно в промышленно развитых регионах, постоянно возрастают. Это сопровождается снижением устойчивости лесонасаждений, ростом пораженности древесного

яруса насекомыми-вредителями и болезнями и постепенной деградацией древесных растений, особенно хвойных. В условиях урбанизации городские древесные насаждения в основном подвергаются воздействию аэротехногенных выбросов, особенно вблизи

зи автомагистралей с интенсивным потоком автотранспорта. По данным ряда авторов, в составе аэротехногенных выбросов автотранспорта преобладают оксид углерода (70%), углеводороды (19%), оксиды азота (9%) [1]. Они вызывают повреждение ассимиляционного аппарата городских лесонасаждений [2]. Ранее нами было обнаружено заметное содержание свинца (валовых форм) в почвах некоторых городских лесопарков г. Екатеринбурга вблизи автомагистралей, приближающееся к 1 ПДК (30 мг/кг) [3]. Очевидно, что аэротехногенное загрязнение от автотранспорта сочетается с общим загрязнением атмосферы городов от промышленных объектов. В частности, среднегодовая концентрация SO_2 в атмосфере г. Екатеринбурга составляла 6,7 мкг/м³ [4]. Несмотря на значительный интерес к исследованию биохимических аспектов взаимоотношений в системе: «аэротехногенное загрязнение – сосна обыкновенная – фенольные соединения», многие аспекты остаются недостаточно изученными, а полученные результаты – противоречивыми [5, 6]. Низкомолекулярные фенольные соединения выполняют важную роль в защите древесных растений от воздействия факторов биотического и абиотического стресса [7, 8]. Одним из основных негативных последствий сорбции и аккумуляции древесными растениями химических компонентов загрязнения является окислительный стресс, который сопровождается генерацией активных форм кислорода [9, 10]. Основным фактором снижения отрицательных последствий окислительного стресса служит активизация клеточной биохимической системы антиоксидантной защиты, включающей как высокомолекулярные соединения (ферменты: супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаза и др.), так и низкомолекулярные химические соединения, особенно флавоноиды [7, 11]. Установлено, что именно ферменты выполняют основную роль в антиоксидантной защите древесных растений [7, 11]. Но и низкомолекулярные фенольные и другие химические соединения также выполняют немаловажную роль в антиоксидантной защите [7]. Известно, что в условиях техногенного загрязнения фенольные соединения обладают способностью к связыванию тяжелых металлов в устойчивые комплексы [12]. Несмотря на интенсивные исследования реакций фенольных соединений на аэротехногенное загрязнение, многие вопросы остаются недостаточно изученными. Остается не-

ясным, как реагируют на этот фактор различные фенольные соединения в клетках хвои в условиях аэротехногенного загрязнения среды. Одни авторы отмечают возрастание содержания фенольных соединений в условиях аэротехногенного загрязнения, другие – снижение [5, 6]. Вообще, фенольные соединения очень активно реагируют на условия обитания растений и факторы внешней среды [8]. На содержание фенольных соединений в хвое заметное воздействие оказывают и условия произрастания хвойных древесных растений. При высокой густоте произрастания содержание фенольных соединений снижалось [13].

Цель исследования: изучение вклада фенольных соединений в биохимические механизмы антиоксидантной защиты и адаптации сосны к аэротехногенному загрязнению в условиях городской среды (вблизи городских магистралей с наиболее интенсивным движением). Исходя из этого основными задачами исследования было изучение методами ВЭЖХ состава и содержания химических соединений в хвое сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения и в контроле, а также – влияния аэротехногенного загрязнения на состав и содержание химических соединений и идентификация флавоноидов с наиболее высоким уровнем антиоксидантной активности. Особенное внимание уделено изучению флавоноидов, которые отличаются высокой антиоксидантной и антирадикальной активностью, способностью к хелатированию тяжелых металлов и выполняют важную роль в адаптации к условиям среды [6–8].

Материалы и методы исследования

Для хроматографического анализа проводился сбор хвои сосны обыкновенной 25-летнего возраста, растущей вблизи наиболее загруженных автотранспортом городских автомагистралей г. Екатеринбурга (5 м) (пр. Ленина). Контрольные пробы взяты в лесопосадках сосны 25-летнего возраста в 68 км от города (Каменск-Уральский р-н) в сходных лесорастительных условиях. Взятие каждой пробы осуществлялось от 3 деревьев одинакового возраста. Затем пробы смешивались для получения средней пробы. Сразу после сбора хвою высушивали при 60 °С и размалывали. Навеску с 2 г хвои смешивали с 20 мл 95% этанола. Экстракцию фенольных соединений из хвои проводили в водяной бане с обратным холодильником в течение 30 мин при кипении

раствора. Затем суспензию центрифугировали при 10000 g в течение 10 мин. Супернатант фильтровали через шприцевой фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. Хроматографический анализ проводили на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-20 со спектрофотометрическим УФ-детектором. Каждая проба анализировалась в трехкратной повторности. Общее количество проб – 18. Детектирование элюента осуществляли одновременно на двух полосах поглощения: 254 и 360 нм на хроматографической колонке PerfectSil Target ODS-3 5 мкм с обращенной фазой, размерами: 250x4,6 мм. Затем вычислялось спектральное отношение параметров абсорбции ($\lambda_{360}/\lambda_{254}$). Градиентное элюирование проводилось в диапазоне 10–50% со скоростью 1 мл в мин при температуре 40 °С. Элюент А: ацетонитрил – 0,05 М фосфатный буферный раствор (рН = 3,0); элюент В: ацетонитрил – вода (9:1). Продолжительность хроматографического анализа – 45 мин. Из них от 0 до 30 мин проводилось градиентное элюирование в диапазоне 10–50%, затем в течение 15 мин – при концентрации 50%. Для идентификации фенольных соединений использовали вещества-свидетели фирмы Sigma, Aldrich, Fluka (25 соединений (рисунок)).

Результаты исследования и их обсуждение

Градиентный хроматографический анализ проб хвои сосны обыкновенной выявил от 63 до 67 химических соединений (рисунок). Как показали результаты сравнительного попарного анализа влияния аэротехногенного загрязнения от автотранспорта на состав и содержание всех химических соединений в хвое сосны, доминирующей реакцией на этот фактор было снижение их содержания. При этом качественный состав соединений не изменялся. В составе этой подгруппы было 47,17% химических соединений. Возрастание содержания химических соединений отмечалось у 28,3% соединений, нейтральная реакция – у 24,53% (рисунок, таблица).

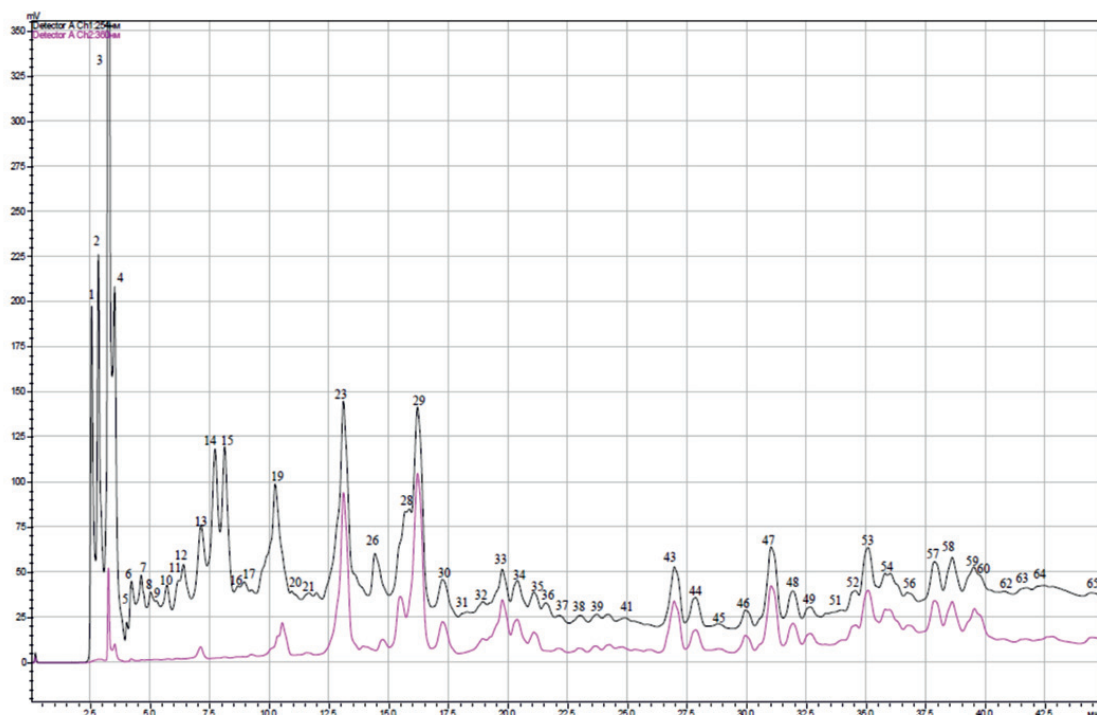
По идентифицированным химическим соединениям нами получены сходные результаты. У 56% химических соединений их содержание также заметно снижается в условиях аэротехногенного загрязнения, по сравнению с контролем, у 32% соединений их содержание возрастает, у 12% – не изменяется (таблица).

Сравнительный анализ идентифицированных химических соединений показал,

что в составе этой группы соединений, содержание которых снижается в условиях аэротехногенного загрязнения, в одинаковом количестве представлены флавоноиды и гидроксикоричные кислоты (по 35,7%). В первой из них были флавоноиды: катехин, гиперозид, феникулин, мирицетин, акацетин. Все они обладают антиоксидантной активностью. Гидроксикоричные кислоты включали: феруловую кислоту, кафтаровую кислоту, 3-кофеилхинную кислоту, 5-кофеилхинную кислоту, кофейную кислоту (рисунок, таблица). Следующую подгруппу составляют фенолгликозиды (21,45%): арбутин, салицин, салидрозид. Последнюю подгруппу составляют витамины (7,15%): аскорбиновая кислота. Она, как известно, обладает высокой антиоксидантной активностью [7].

В составе подгруппы идентифицированных химических соединений, содержание которых возрастало в условиях загрязнения, нами было выявлено значительное преобладание флавоноидов (75%). Это рутин, лютеолин, кверцетин, изорамнетин, апигенин, кемпферол. Все эти флавоноиды обладают антиоксидантной активностью. Остальные 25% соединений – органические кислоты (галловая кислота) и фенольные соединения (гидрохинон). Наиболее интенсивное возрастание содержания в условиях аэротехногенного загрязнения из флавоноидов выявлено у апигенина (в 2,45 раза) и кемпферола (в 2,23 раза), у остальных оно также заметно возрастало (в 1,47–1,53 раза). Из других химических соединений наиболее значительно в условиях загрязнения содержание возрастало у гидрохинона (в 2,39 раза) (таблица).

Как показали результаты сравнительного анализа состава химических соединений в условиях интенсивного техногенного загрязнения, у части гидроксикоричных кислот, флавоноидов и всех фенолгликозидов содержание не изменялось. В составе неидентифицированных химических соединений преобладающей реакцией на аэротехногенное воздействие у сосны обыкновенной было также снижение содержания химических соединений (68,97%). В этой подгруппе содержание химических соединений в условиях аэротехногенного воздействия возрастало лишь у пяти соединений, что составляло 17,23% от их общего количества в подгруппе. Отсутствовало статистически достоверное изменение содержания химических соединений у 13,8% (таблица). У отдельных неидентифицированных соединений их изменение содержания было двух-трехкратным.



Градиентная хроматография экстракта хвои сосны обыкновенной. Контроль. По горизонтали: T_r (время удерживания (мин)), по вертикали: абсорбция, mV : 1 – аскорбиновая кислота; 2 – арбутин; 3 – галловая кислота; 5 – кафтаровая кислота; 6 – 3 – кофеоилхинная кислота; 7 – салицин; 8 – гидрохинон; 10 – кофейная кислота; 12 – салидрозид; 13 – катехин; 17 – рутин; 19 – 5 – кофеоилхинная кислота; 21 – изокверцетин; 22 – феруловая кислота; 23 – гиперозид; 24 – бензойная кислота; 26 – дигидрокверцетин; 28 – феникулин; 30 – мирицетин; 38 – лютеолин; 41 – кверцетин; 44 – изорамнетин; 45 – апигенин; 46 – кемпферол; 62 – акацетин

Влияние аэротехногенного загрязнения на содержание химических соединений в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Наименование химического соединения	Сосна. Контроль				Сосна. Загрязнение				
	№ пика	T_r	λ ($\frac{S_{360}}{S_{254}}$)	Абсорбция (mv)	T_r	λ ($\frac{S_{360}}{S_{254}}$)	Абсорбция (mv)	T_{St}	P
Аскорбиновая кислота	1	2,51	0,007	180,0 ± 25,35	2,51	0,007	120,87 ± 16,6	2,83	0,05
Арбутин	2	2,89	0,013	210,5 ± 9,81	2,76	0,009	178,26 ± 7,01	3,75	0,05
Галловая к-та	3	3,31	0,18	286,5 ± 8,16	3,23	0,137	308,26 ± 8,12	3,64	0,05
Кафтаровая к-та	5	4,05	0,095	41,33 ± 2,83	4,05	0,095	27,28 ± 2,12	5,62	0,03
3-кофеоилхинная к-та	6	4,25	0,044	32,69 ± 1,98	4,25	0,08	23,83 ± 1,55	4,97	0,038
Салицин	7	4,68	0,024	44,6 ± 6,18	4,55	0,021	25,48 ± 2,91	3,96	0,051
Гидрохинон	8	5,0	0,029	35,0 ± 3,53	5,15	0,0046	83,74 ± 11,73	5,62	0,03
НС*	9	5,25	0,034	29,35 ± 1,86	5,50	0,046	23,36 ± 1,48	4,52	0,05
Кофейная к-та	10	5,75	0,37	28,16 ± 2,97	5,75	0,39	13,89 ± 1,27	6,24	0,024
Салидрозид	12	6,2	0,029	38,65 ± 4,38	6,25	0,236	18,09 ± 1,84	6,11	0,025
НС*		6,45	0,023	47,5 ± 3,24	6,65	0,0109	36,83 ± 1,91	3,95	0,05
Катехин	13	7,12	0,105	67,85 ± 8,06	7,35	0,024	25,52 ± 2,54	7,08	0,019
НС*	14	7,74	0,013	109,1 ± 11,59	7,75	0,03	57,41 ± 5,79	5,64	0,03
НС*	15	8,13	0,013	110,5 ± 10,04	8,21	0,0107	59,86 ± 6,08	6,1	0,025
Рутин	17	9,25	0,103	29,32 ± 3,05	9,28	0,228	44,76 ± 5,21	3,98	0,05
5-Кофеоилхинная к-та	19	10,25	0,44	62,86 ± 7,01	9,81	0,308	41,66 ± 4,22	3,97	0,05
НС*	20	11,0	0,04	25,0 ± 2,20	10,72	0,041	18,88 ± 0,82	3,87	0,051
Изокверцетин**	21	11,75	0,98	3,47 ± 0,24	11,71	0,77	3,13 ± 0,19	1,54	0,26

Окончание таблицы									
Наименование химического соединения	Сосна. Контроль				Сосна. Загрязнение				
	№ пика	T _r	λ ($\frac{S_{360}}{S_{254}}$)	Абсорбция (mv)	T _r	λ ($\frac{S_{360}}{S_{254}}$)	Абсорбция (mv)	T _{St}	P
Феруловая к-та	22	11,99	0,209	22,60 ± 2,82	11,77	0,21	13,67 ± 1,41	3,99	0,05
Гиперозид	23	13,0	0,717	109,18 ± 12,86	12,56	0,671	63,27 ± 7,35	4,38	0,048
Бензойная к-та**	24	13,55	0,194	31,0 ± 2,26	13,0	0,09	27,69 ± 1,97	1,55	0,25
Дигидрокверцетин**	26	14,5	0,421	24,5 ± 1,55	14,28	0,411	22,38 ± 1,27	1,49	0,27
Феникулин	28	15,75	0,525	51,59 ± 5,65	15,07	0,835	33,22 ± 1,69	4,39	0,047
НС*	29	16,25	0,838	118,95 ± 10,18	15,77	0,680	74,78 ± 5,79	5,32	0,033
Мирицетин	30	17,3	0,914	21,73 ± 2,40	16,87	0,89	11,19 ± 1,13	5,60	0,03
НС*	33	18,32	0,323	3,25 ± 0,424	18,56	0,324	9,72 ± 1,273	6,82	0,021
НС**	34	19,0	1,018	8,5 ± 0,56	19,0	0,925	8,67 ± 0,57	0,30	0,79
НС**	35	19,8	1,11	27,0 ± 1,98	19,5	0,925	23,43 ± 1,56	2,00	0,18
НС**	36	20,48	0,905	21,0 ± 2,83	20,12	0,767	20,98 ± 2,69	0,07	0,99
НС*		21,11	0,755	15,7 ± 1,69	20,88	0,617	8,39 ± 0,84	5,45	0,032
НС*	37	21,62	0,20	10,0 ± 1,13	21,5	0,176	5,94 ± 0,565	4,54	0,045
Лютеолин	38	23,0	0,724	3,8 ± 0,282	22,85	0,525	5,59 ± 0,233	6,38	0,023
НС*	39	23,25	0,545	5,5 ± 0,495	23,46	0,428	10,14 ± 0,91	6,29	0,024
НС**	40	24,21	1,05	5,25 ± 0,424	24,21	1,05	5,43 ± 0,422	0,42	0,712
Кверцетин	41	24,9	0,92	4,17 ± 0,354	24,7	0,82	6,39 ± 0,438	5,57	0,03
НС*	43	27,0	0,872	32,75 ± 0,42	26,85	0,814	50,69 ± 6,15	3,96	0,05
Изорамнетин	44	27,9	0,768	15,87 ± 1,66	27,73	0,75	24,33 ± 2,14	3,98	0,05
Апигенин	45	28,8	0,80	2,5 ± 0,212	28,75	0,82	6,137 ± 0,56	8,51	0,013
Кемпферол	46	30,0	0,878	10,25 ± 0,15	29,85	0,857	22,83 ± 0,32	8,51	0,0004
НС*	48	31,0	0,828	43,5 ± 2,16	30,87	0,823	34,42 ± 1,85	3,89	0,05
НС*	49	31,95	0,857	17,5 ± 1,34	31,9	0,80	12,88 ± 0,82	3,97	0,05
НС**	51	32,65	0,983	9,0 ± 0,565	32,51	0,821	10,3 ± 0,636	2,15	0,163
НС*	53	34,0	1,00	5,75 ± 0,705	33,9	0,37	9,61 ± 1,13	0,05	4,09
НС**		34,61	0,83	15,5 ± 1,13	34,49	0,45	16,95 ± 1,27	1,20	0,35
НС**	54	35,11	0,818	39,0 ± 3,535	35,0	0,683	43,004 ± 3,8	1,08	0,390
НС*		35,81	0,898	24,5 ± 2,121	35,91	0,75	35,62 ± 2,82	4,44	0,047
НС**		36,13	0,892	23,55 ± 2,82	36,25	0,674	22,92 ± 2,54	0,23	0,836
НС**	55	36,75	0,991	11,6 ± 1,131	36,75	0,705	9,61 ± 0,988	1,87	0,202
НС*	56	38,0	0,849	29,8 ± 2,828	38,7	0,756	109,0 ± 9,89	10,8	0,008
НС*	57	39,62	0,9	24,0 ± 2,828	39,42	0,707	60,09 ± 7,07	6,68	0,021
НС**	59	40,81	0,355	8,6 ± 0,848	40,85	0,888	10,73 ± 1,13	2,13	0,166
Акацетин	62	42,5	0,351	10,4 ± 0,848	42,75	0,988	6,87 ± 0,565	4,89	0,0392
НС*	63	44,5	0,85	5,0 ± 0,424	44,5	1,05	3,35 ± 0,283	4,57	0,0445

Примечание: НС* – неидентифицированное химическое соединение, НС** – различия статистически недостоверны.

Таким образом, в целом реакция разных химических соединений в клетках хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения была различной. Доминирующей реакцией было снижение содержания этих соединений. Это противоречит полученным нами ранее результатам исследования [14]. Это может быть обусловлено тем, что в год предыдущего исследования наблюдалось воздействие фактора абиотического стресса (майской засухи), которая могла повлиять на реакцию химических соединений в хвое сосны, так и тем, что в данном исследовании коли-

чество идентифицированных химических соединений было значительно больше, чем в предыдущем. Кроме того, важным фактором, результатов экспериментов ряда других авторов, было исследование содержания фенольных соединений вблизи крупных промышленных предприятий, продуцирующих значительное количество аэротехногенных выбросов (особенно соединений серы, негативно влияющих на хвойные древесные растения), а не аэротехногенных выбросов автотранспорта, где эти соединения почти отсутствуют, что и повлияло на характер реакции феноль-

ных соединений в хвое. Кроме того, анализ уровня, типа и характера реакций различных растений на содержание свинца в почве показал, что у разных групп растений существуют разные стратегии отношения к воздействию этого фактора и разные уровни, характер и направление реакций полифенолов [15]. Учитывая это, сравнение реакций фенольных соединений у разных по стратегии отклика групп растений, вероятно, не всегда целесообразно.

Выводы

1. В целом результаты показали, что аэротехногенное загрязнение вызывает разнонаправленные реакции низкомолекулярных химических соединений в клетках хвои сосны обыкновенной, но преобладает реакция снижения содержания химических соединений в хвое.

2. У флавоноидов доминирующей реакцией в хвое сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения вблизи автомагистралей является возрастание их содержания (у 75%). Это, очевидно, обусловлено высоким уровнем антиоксидантной активности флавоноидов и уровнем стрессовой реакции на воздействие факторов среды, а также – сформировавшимся в динамике эволюции вида уровнем, типом и характером реакции на стресс.

3. Идентифицированы флавоноиды с наиболее высоким уровнем антиоксидантной активности.

4. Учитывая то, что одним из основных негативных последствий аккумуляции клетками хвои сосны обыкновенной химических компонентов загрязнения является оксидативный стресс, а главным фактором снижения отрицательных последствий – активизация клеточной биохимической системы антиоксидантной защиты, включающей и фенольные соединения, можно предполагать, что их вклад в борьбу с антиоксидантным стрессом является существенным, особенно у флавоноидов. Это служит важным компонентом механизма биохимической адаптации сосны обыкновенной к аэротехногенному загрязнению в условиях урбанизации.

Список литературы / References

1. Гурьев Г.А., Тутыгин Г.С. Оценка загрязнённости придорожной полосы автомобильных дорог // Экологические проблемы Европейского Севера: сборник научных трудов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. С. 90–96.

Gurev G.A., Tutugin G.S. Assessment of roadside roadside pollution // *Ekologicheskiye problemy Yevropeyskogo Severa: sbornik nauchnykh trudov*. Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 1996. P. 90–96 (in Russian).

2. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжёлые металлы и растения. Петрозаводск, 2014. 194 с.

Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. Heavy Metals and Plants. Petrozavodsk, 2014. 194 p. (in Russian).

3. Залесов С.В., Колтунов Е.В. Содержание тяжёлых металлов в почвах лесопарков г. Екатеринбурга // *Аграрный вестник Урала*. 2009. № 6 (60). С. 71–72.

Zalesov S.V., Koltunov E.V. The maintenance of heavy metals in soil of city forest parks of ekaterinburg // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2009. № 6 (60). P. 71–72 (in Russian).

4. Безуглая Э.Ю., Завадская Е.К., Ивлева Т.П., Смирнова И.В., Воробьева И.А. Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет 1998–2007 гг. М.: Росгидромет, 2009. 133 с.

Bezuglaya E.U., Zavadskaya E.K., Ivleva T.P., Smirnova I.V., Vorobyeva I.A. Air quality in the largest cities of Russia for ten years 1998–2007. M.: Roshydromet, 2009. 133 p. (in Russian).

5. Иванова Е.Ю. Оценка состояния атмосферного воздуха города Нововоронежа биологическими методами // *Вестник ВГУ. Серия: География, геоэкология*. 2013. № 1. С. 157–162.

Ivanova E.Yu. Assessment of the state of atmospheric air of the city of Novovoronezh by biological methods // *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya, geoekologiya*. 2013. № 1. P. 157–162 (in Russian).

6. Луговская А.Ю., Храмова Е.П., Трубина Л.К. Оценка влияния транспортно-промышленного загрязнения на морфологические и биохимические показатели *Potentilla Fruticosa (Rosaceae)* // *Растительный мир Азиатской России*. 2014. № 1 (13). С. 71–76.

Lugovskaya A.Yu., Khramova E.P., Trubina L.K. Assessment of the impact of transport pollution on the morphological and biochemical parameters *Potentilla Fruticosa (Rosaceae)* // *Plant Life of Asian Russia*. 2014. № 1 (13). P. 71–76 (in Russian).

7. Запрометов М.Н. Фенольные соединения: распространение, метаболизм и функции в растениях. М.: Наука, 1993. 272 с.

Zaprometov M.N. Phenolic compounds: distribution, metabolism and function in plants. M.: Nauka, 1993. 272 p. (in Russian).

8. Щербakov А.В. Особенности состава флавоноидов популяций растений как проявление адаптаций в геохимических условиях южного Зауралья: дис. ... докт. биол. наук. Оренбург, 2014. 288 с.

Shcherbakov A.V. Features of the composition of flavonoids of plant populations as a manifestation of adaptations in the geochemical conditions of the southern Trans-Urals: dis. ... dokt. biol. nauk. Orenburg, 2014. 288 p. (in Russian).

9. Гарифзянов А.Р., Ермакова И.А., Пантюхин Ю.О., Иванищев В.В. Окислительный стресс и уровень антиоксидантных ферментов в органах × TRITICOSECALE при действии кадмия // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 4–1. С. 190–195.

Garifzyanov A.R., Ermakova I.A., Pantyukhin Yu.O., Ivanishchev V.V. Oxidative stress and the level of antioxidant enzymes in organs × TRITICOSECALE under the action of cadmium // *Fundamental research*. 2012. № 4–1. P. 190–195 (in Russian).

10. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. Antioxidants, Oxidative Damage and Oxygen Deprivation Stress: a Review. *Annals of Botany*. 2003. V. 91. P. 179–194. DOI: 10.1093/aob/mcf118.

11. Иванов Ю.В., Савочкин Ю.В., Кузнецов В.В., Сосна обыкновенная как модельный объект для изучения механизмов адаптации хвойных к действию тяжёлых металлов. 2. Функционирование антиоксидантных ферментов в сеянцах сосны в условиях хронического действия цинка // *Физиология растений*. 2012. Т. 59. № 1. С. 57–66.

Ivanov Y.V., Savochkin Y.V., Kuznetsov V.V. Scots pine as a model plant for studying the mechanisms of conifers adaptation to heavy metal action: 2. Functioning of antioxidant

enzymes in pine seedlings under chronic zinc action // Russian Journal of Plant Physiology. 2012. V. 59. № 1. P. 50–58. DOI: 10.1134/S1021443712010098.

12. Gill S.S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 2010. V. 48. P. 909–930.

13. Плаксина И.В., Судачкова Н.Е., Романова Л.И., Милютин И.Л. Сезонная динамика фенольных соединений в лубе и хвое сосны обыкновенной и кедра сибирского в посадках различной густоты // *Химия растительного сырья*. 2009. № 1. С. 103–108.

Plaksina I.V., Sudachkova N.E., Romanova L.I., Milyutina I.L. Phenolic compounds seasonal dynamics in *pinus sylvestris* l. And *pinus sibirica* du tour inner bark and needles at different planting densities // *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2009. № 1. P. 103–108 (in Russian).

14. Шавнин С.А., Колтунов Е.В., Яковлева М.И. Влияние урбанизации на состав и содержание фенольных соединений в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) //

Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=17151> (дата обращения: 12.07.2019).

Shavnin S.A., Koltunov E.V., Yakovleva M.I. Influence of urbanization on the composition and content of phenolic compounds in the needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // *Modern problems of science and education*. 2014. № 6. [Electronic resource]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=17151> (date of access: 12.07.2019) (in Russian).

15. Масленников П.В., Чупахина Г.Н., Скрыпник Л.Н., Федурев П.В., Мельник А.С. Оценка антиоксидантного потенциала растений урбоэкосистем в условиях антропогенного загрязнения почв // *Экология*. 2018. № 5. С. 342–355. DOI: 10.1134/S0367059718050062.

Maslennikov P.V., Chupakhina G.N., Skrypnik L.N., Feduraev P.V., Melnik A.S. Assessment of the Antioxidant Potential of Plants in Urban Ecosystems under Conditions of Anthropogenic Pollution of Soils // *Russian Journal of Ecology*. 2018. T. 49. № 5. P. 384–394. DOI: 10.1134/S1067413618050065.