

УДК 574.24 : 581.19
doi: 10.17223/19988591/18/18

Г.Н. Чупахина, П.В. Масленников, Л.Н. Скрышник, М.И. Бессережнова

Российский государственный университет им. И. Канта (г. Калининград, Россия)

РЕАКЦИЯ ПИГМЕНТНОЙ И АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМ РАСТЕНИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ г. КАЛИНИНГРАДА ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта РГУ им. И. Канта № 01-004-09.

Изучена реакция пигментной и антиоксидантной систем растений фитоурбоценозов г. Калининграда на загрязнение окружающей среды выбросами автотранспорта. Показано превышение фонового содержания кадмия в растительных пробах г. Калининграда и выявлена положительная корреляционная связь между его содержанием в растениях и интенсивностью движения автотранспорта. Выявлены высокая отрицательная корреляционная связь между содержанием Cd в растениях и их антиоксидантным статусом и положительная корреляция между содержанием Cd и накоплением антоцианов. Приведены данные по содержанию фотосинтетических пигментов в растениях в условиях атмосферного загрязнения. Снижение антиоксидантного статуса и активности фотосинтетического аппарата – симптомы неудовлетворительного состояния растений вследствие сильного разрушающего действия автомобильных поллютантов. Активное накопление антоцианов в вакуолях клеток может повысить эффективность антиоксидантной системы в процессах нейтрализации продуктов окислительного стресса и способствовать повышению устойчивости растений к действию кадмия.

Ключевые слова: техногенное загрязнение; кадмий; фитоурбоценозы; антиоксиданты; биоиндикация.

Введение

В последние десятилетия отмечаются рост городов и возрастание площадей урбанизированных территорий, что создает многие кризисные экологические проблемы. В пределах городов наблюдаются суммарное воздействие большого числа негативных факторов, а также максимальная концентрация химических веществ, приводящая к ухудшению условий жизни населения. Так, например, атмосферный воздух г. Калининграда по составу загрязняющих веществ является типичным для современных городов с развитой транспортной инфраструктурой. Удельный вес выбросов от городского автотранспорта в суммарном антропогенном выбросе вредных веществ составляет 83,8%, превышая более чем в 6 раз выбросы от стационарных источников [1].

Исследования различных урбоэкосистем показывают [2, 3], что для эффективного управления качеством городской среды необходимо обладать достаточной информацией об эколого-физиологическом состоянии городских фитоценозов, позволяющей оценить функциональный вклад каждого вида в изменение качества среды в направлении ее улучшения. В связи с этим оценка влияния выбросов автотранспорта на состояние городских экосистем в настоящее время приобретает исключительно важное значение.

Среди широкого спектра исследуемых компонентов урбоэкосистем большое внимание отводится изучению состояния травянистых и древесных насаждений. Установлены высокие уровни корреляционных связей между морфологическими и физиологическими параметрами древесных растений и токсикологическими нагрузками [4]. Показано, что древесные растения обладают высокой чувствительностью к антропогенной нагрузке, поэтому могут служить адекватными индикаторами состояния урбоэкосистемы [4]. В качестве диагностических признаков, несомненно, должны использоваться наиболее чувствительные к экологическим воздействиям информативные функции и процессы на всех уровнях организации растений: клеточном, тканевом, организменном и экосистемном. Для ранней диагностики состояния растений урбоэкосистем могут быть использованы физиолого-биохимические характеристики ассимилирующих органов, которые в значительной мере определяют ростовые и репродуктивные процессы, а также наиболее чувствительны к экологическим изменениям окружающей среды [5]. Известно, что одним из биохимических показателей реакции растений на изменение факторов внешней среды, степени их адаптации к новым экологическим условиям является содержание хлорофиллов и каротиноидов – главных фоторецепторов фотосинтезирующей клетки. Кроме того, уровень водорастворимых антиоксидантов, антоциановых пигментов, обладающих разносторонним действием на физиологические процессы в растительных клетках и, как в последнее время считают, участвующих в системной приобретенной устойчивости растений к стрессовым факторам, также может быть использован для оценки их физиологического состояния [6, 7].

Цель настоящей работы – оценка влияния выбросов автотранспорта на состояние растений и определение его вклада в загрязнение окружающей среды г. Калининграда.

Материалы и методики исследования

Район исследования – 6 постоянных пробных площадок на территории г. Калининграда (ИУ1–ИУ6), расположенных в придорожных зонах (до 5 м от дорожного полотна) на основных автомагистралях областного центра. Пробные площадки были разбиты с учетом оценки общего состояния городской среды и находились в разных районах города. Контрольный участок располагался на значительном удалении от городской черты (более 40 км)

на территории «Национального парка Куршская коса». По климатическим условиям рассеивания вредных веществ территория «Национального парка Куршская коса» относится к зоне с низким потенциалом загрязнения атмосферы, фоновые концентрации загрязняющих веществ на контрольном участке не превышают ПДК для атмосферного воздуха населенных мест (коэффициент экологической ситуации 0,8) [1]. Степень загрязнения атмосферного воздуха пробных участков г. Калининграда определяется выбросами более 200 промышленных предприятий города, ТЭЦ, котельных, но наибольший вклад в его загрязнение вносит автотранспорт. С учетом комплексной оценки состояния окружающей городской среды уровень загрязнения на пробных участках ИУ1, ИУ4, ИУ5 оценивался как умеренно загрязненный, на ИУ6 – загрязненный, ИУ2 – грязный, ИУ3 – очень грязный [8].

Для биогеохимического апробирования были использованы наиболее распространенные в городских ландшафтах виды древесных и травянистых растений: ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) Karst.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Webb.), подорожник большой (*Plantago major* L.).

Сбор материала (кора, хвоя, листья) проводился в течение вегетационного периода (июнь – июль) 2009 г. Образцы отбирались на нижних ветках взрослых деревьев с указанием места отбора, вида, диаметра дерева, высоты взятия пробы. Отбиралась смешанная проба с деревьев одного вида. Выделение средней пробы проводилось в сухую погоду в соответствии с ГОСТом 27262-87 «Корма растительного происхождения. Методы отбора проб» [2]. Пробы растений высушивали при +65°C до постоянного веса. Высушенные растения измельчали в мельнице из нержавеющей стали и пропускали через 0,25-миллиметровое сито. Сухие образцы (5 г) озоляли в муфельной печи при постепенно возрастающей температуре от +25 до +450°C в течение 1,5 ч, последующие 2 ч озоление проводили при +450°C. Золу растворяли в 20 мл смеси концентрированных кислот HCl и HNO₃ (3:1), затем разбавляли (1:20) деионизированной водой [9]. Концентрацию кадмия в растительном материале определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Varian AA 240 FS (США).

Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха (по концентрации СО) на пробных участках проводилась с учетом интенсивности и состава транспортных потоков, коэффициентов, учитывающих аэрацию местности, влажность воздуха, скорость ветра, замедление движения транспорта на светофорах и пересечениях улиц. Используемая методика позволяет рассчитать средний дневной выброс угарного газа [10].

Количественное определение хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов было проведено спектрофотометрически без предварительного разделения в 100%-ной ацетоновой вытяжке с последующим расчетом по формуле Хольма – Веттштейна [11]. Концентрацию антоциановых пигментов определяли спектрофотометрически в 1%-ном солянокислом водном экстракте при дли-

не волны 510 нм, предварительно гомогенат центрифугировали при 4 500 g в течение 30 мин. Для внесения поправок на содержание зеленых пигментов определяли оптическую плотность полученных экстрактов при 657 нм. Содержание суммы антоцианов рассчитывали по цианидин-3,5-дигликозиду [12]. Поглощение данных пигментов определяли на спектрофотометре «СФ-2000» (ЗАО «ОКБ СПЕКТР», Россия).

Массовую концентрацию антиоксидантов (АОА) в исследуемых образцах, эквивалентную кверцетину, определяли амперометрическим методом на приборе «Цвет Яуза 01-ААА» (НПО «Химавтоматика», Россия) по методике Я.И. Яшина [13]. Содержание исследуемых веществ приведено на грамм сухого веса. В ходе исследования было отобрано и проанализировано 378 проб. Анализ проводился в трехкратной биологической ($n = 3$) и не менее чем в трех аналитических повторностях. Полученные данные обработаны статистически и представлены в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок. Статистическая значимость различий между вариантами определяли с помощью t -критерия Стьюдента ($p \leq 0,05$). Корреляционный анализ проводили с помощью критерия Пирсона. Статистическая обработка результатов и построение графиков выполнены в программе Stat-Soft STATISTICA 8.0 и MS Excel 2003.

Результаты исследования и обсуждение

Территория г. Калининграда характеризуется различным уровнем загрязнения, степень которого на пробных участках оценивалась по показателям интенсивности движения автомобильного транспорта и уровню загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами (по концентрации СО). В табл. 1 приведены результаты комплексной оценки атмотехногенного загрязнения пробных площадок г. Калининграда и для сравнения – контрольного участка (фон).

Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха выявлено на основных автомагистралях г. Калининграда с высокой интенсивностью движения автотранспорта. Суммарная оценка загруженности улиц автотранспортом на пробных участках показала, что низкая интенсивность движения автотранспорта наблюдалась только на контрольном участке (168 авт./ч), средняя интенсивность – на ИУ1 (252 авт./ч), высокая – на ИУ5 (840 авт./ч). Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха (по концентрации СО) показала превышение ПДК_{м.р.} окиси углерода (5 мг/м³) на всех ИУ за исключением контрольного (1,9 мг/м³) и ИУ1 (3,5 мг/м³). Максимальный уровень интенсивности движения автотранспорта 1784–1794 авт./ч и загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами 36,4–39,6 мг/м³ наблюдался на ИУ2 и ИУ3.

Анализ данных по содержанию кадмия показал, что в растительных пробах г. Калининграда выявлено значительное превышение его фонового

уровня. Минимальное содержание кадмия у исследуемых растений наблюдалось в пробах Куршской косы (контроль). Содержание кадмия в листьях липы и хвое ели составило $0,17 \pm 0,01$ мг/кг сухой массы, в листьях одуванчика – $0,15 \pm 0,01$ мг/кг, в листьях подорожника – $0,35 \pm 0,03$ мг/кг. Содержание кадмия в коре липы и ели составило $0,2-0,22 \pm 0,01$ мг/кг.

Т а б л и ц а 1

**Оценка атмотехногенного загрязнения пробных участков
г. Калининграда и фонового (контроль) [1, 14]**

№ ИУ	Концентрация загрязняющих веществ в 10 м от проезжей части, ПДК**	Выброс загрязняющих веществ на участке автомагистрали, т/год/км***	Интенсивность движения автотранспорта, авт./ч	Уровень загрязнения атмосферного воздуха (по концентрации СО), мг/м ³	Комплексная оценка состояния окружающей городской среды, зоны
Фон (К)	<1	<50	168	1,9	Относительно чистая
ИУ1	1–1,5	0–100	252	3,5	Умеренно загрязненная
ИУ2	3–4	300–400	1 784	39,6	Грязная *
ИУ3	2–3	200–300	1 794	36,4	Очень грязная*
ИУ4	3–4	100–200	1 374	28,1	Умеренно загрязненная
ИУ5	2–3	300–400	840	17,3	Умеренно загрязненная
ИУ6	1,5–2	100–200	1 224	25,1	Загрязненная *

* Загрязнение, превышающее действующие нормативы.

** Сумма нормированных (отнесенных к ПДК) среднегодовых концентраций основных загрязняющих веществ (пыль, двуокись серы, окись углерода, окислы азота, углеводороды).

*** Суммарный выброс 15 приоритетных загрязняющих веществ в воздушный бассейн г. Калининграда.

Максимальное накопление кадмия наблюдалось у растений на пробном участке с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха выхлопами автотранспорта (ИУ2): концентрация ионов кадмия в листьях и коре липы сердцевидной превышала аналогичный показатель в контроле в 4 и 4,3 раза, в хвое и коре ели обыкновенной – в 3,4 и 3,1 раза соответственно. Содержание ионов кадмия в листьях одуванчика лекарственного и подорожника большого на ИУ2 в среднем было выше контрольного уровня в 4,3 и 2,7 раза (рис. 1).

У древесных растений липы сердцевидной и ели обыкновенной наибольшее накопление кадмия наблюдалось в коре: у сосны содержание кадмия в среднем было выше на 25%, у липы – на 45% по сравнению с его содержанием в листьях и хвое данных растений.

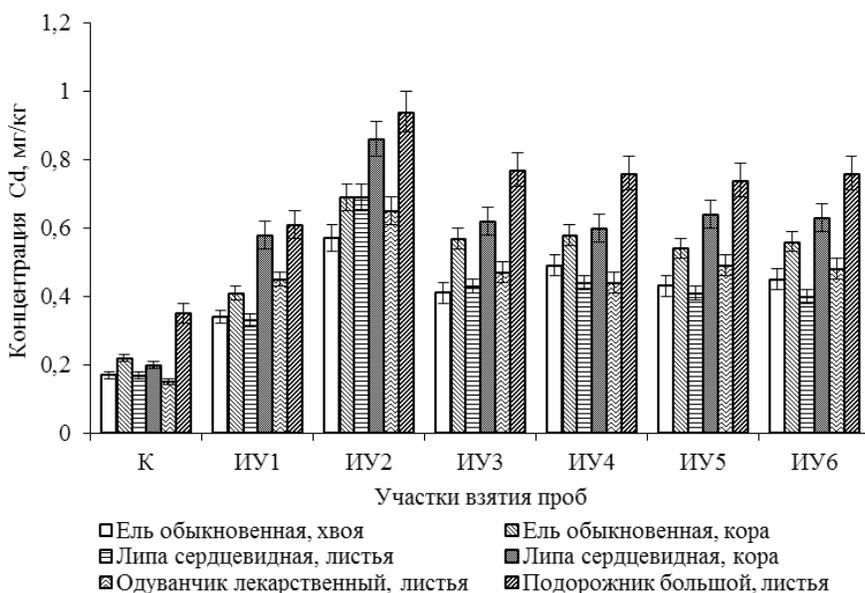


Рис. 1. Концентрация ионов кадмия в исследуемых растениях фонового (К) и экспериментальных участков (ИУ1–ИУ6) с различным уровнем атмотехногенного загрязнения. Данные представлены в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок

Фоновое содержание кадмия в листьях подорожника было выше в 2,3 раза по сравнению с его содержанием в растениях одуванчика. Содержание кадмия в листьях одуванчика составило $0,15 \pm 0,01$ мг/кг, в листьях подорожника – $0,35 \pm 0,03$ мг/кг. В городской черте растения подорожника накапливали кадмий в меньшей степени, чем растения одуванчика, но содержали более высокий уровень Cd. В листьях одуванчика его содержание составило $0,65 \pm 0,04$ мг/кг, в листьях подорожника – $0,94 \pm 0,06$ мг/кг.

Установлено, что загрязнение пробных участков газообразными автомобильными поллютантами оказывает влияние на пигментную систему древесных и травянистых растений. С ростом атмотехногенного загрязнения на пробных участках в исследуемых растениях наблюдалось уменьшение содержания общего фонда зеленых пигментов по сравнению с фоновыми условиями. В листьях липы на участке с максимальным уровнем загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами ($39,6$ мг/м³) содержание хлорофилла *a* и *b* было ниже в 2 и 3,7 раза, в хвое ели – в 1,5 и 1,9 раза, в листьях одуванчика – в 1,3 и 1,8 раза, в листьях подорожника – в 1,4 и 1,5 раза по сравнению с контролем соответственно (табл. 2). При этом в растениях наблюдалось снижение уровня хлорофилла *b* в большей степени, чем хлорофилла *a*, о чем свидетельствует соотношение спектральных форм зеленых пигментов. В условиях максимального загрязнения (ИУ2) в листьях липы *a/b* увеличилось на 90%, в листьях одуванчика и хвое ели – в среднем

на 30%, в листьях подорожника показатель a/b не имел достоверных различий по сравнению с фоном. Кроме этого, на данном участке в растительных тканях, за исключением липы, наблюдалось снижение величины отношения суммы зеленых пигментов к сумме желтых на 13–80%.

Т а б л и ц а 2

Содержание пластидных пигментов в растениях фонового и экспериментальных участков с различным уровнем атмотехногенного загрязнения

№ ИУ	Виды растений			
	Ель обыкновенная	Липа сердцевидная	Одуванчик лекарственный	Подорожник большой
	Содержание хлорофилла a , мг/г			
Фон	1,91 ± 0,12	2,24 ± 0,20	5,51 ± 0,21	2,71 ± 0,11
ИУ1	1,44 ± 0,11*	1,41 ± 0,11*	4,71 ± 0,22	2,21 ± 0,10
ИУ2	1,32 ± 0,10*	1,12 ± 0,09*	4,12 ± 0,21*	2,11 ± 0,12*
ИУ3	1,51 ± 0,12*	1,21 ± 0,11*	4,21 ± 0,22*	1,91 ± 0,13*
ИУ4	1,42 ± 0,11*	1,13 ± 0,12*	4,24 ± 0,21*	2,12 ± 0,14*
ИУ5	1,41 ± 0,12*	1,23 ± 0,11*	4,13 ± 0,23*	2,01 ± 0,12*
ИУ6	1,43 ± 0,13*	1,24 ± 0,12*	4,12 ± 0,21*	2,02 ± 0,12*
	Содержание хлорофилла b , мг/г			
Фон	1,37 ± 0,08	1,56 ± 0,1	2,89 ± 0,12*	1,19 ± 0,08
ИУ1	1,11 ± 0,08	0,75 ± 0,05*	2,17 ± 0,12*	0,99 ± 0,04
ИУ2	0,71 ± 0,05*	0,42 ± 0,04*	1,64 ± 0,1*	0,78 ± 0,05*
ИУ3	0,82 ± 0,05*	0,54 ± 0,04*	1,54 ± 0,1*	0,73 ± 0,04*
ИУ4	0,79 ± 0,06*	0,44 ± 0,03*	1,61 ± 0,11*	0,8 ± 0,04*
ИУ5	0,75 ± 0,05*	0,49 ± 0,03*	1,61 ± 0,1*	0,75 ± 0,04*
ИУ6	0,78 ± 0,05*	0,49 ± 0,03*	1,62 ± 0,1*	0,76 ± 0,04*
	Содержание каротиноидов, мг/г			
Фон	2,59 ± 0,19	0,58 ± 0,03	1,11 ± 0,09	0,84 ± 0,05
ИУ1	1,72 ± 0,12*	0,52 ± 0,03	0,91 ± 0,08	0,63 ± 0,04
ИУ2	1,76 ± 0,13*	0,18 ± 0,01*	1,36 ± 0,1*	0,72 ± 0,04
ИУ3	1,51 ± 0,12*	0,25 ± 0,02*	1,25 ± 0,1	0,69 ± 0,03
ИУ4	1,55 ± 0,11*	0,21 ± 0,01*	1,28 ± 0,1	0,64 ± 0,04
ИУ5	1,11 ± 0,1*	0,21 ± 0,01*	1,29 ± 0,09	0,71 ± 0,04
ИУ6	1,54 ± 0,12*	0,22 ± 0,02*	1,3 ± 0,1	0,69 ± 0,03

* Статистически значимые различия по содержанию пигментов между фоном и загрязненными участками ($p \leq 0,05$).

В работе оценивались уровень некоторых антиоксидантов – биохимических маркеров стрессового состояния растений – и их суммарная антиоксидантная активность. В качестве таких маркеров использовали каротиноиды и антоциановые пигменты. Показано, что с увеличением степени загрязнения атмосферы пробных участков содержание антоцианов в исследуемых растениях увеличивалось. В условиях максимального загрязнения автомобильными выхлопами (ИУ2) уровень антоцианов был выше фонового: в хвое ели и листьях липы – в 2,2 и 8,9 раза, в листьях одуванчика и подорожника – в 4,2 и 4 раза соответственно (рис. 2). В накоплении каротиноидов у исследуемых растений выявлена видоспецифичность: в аналогичных

условиях (ИУ2) в хвое ели и листьях липы их содержание уменьшалось в 1,5 и 3,2 раза, в растениях подорожника изменялось незначительно, а в листьях одуванчика лекарственного их уровень был выше в 1,23 раза по сравнению с контрольным (см. табл. 2).

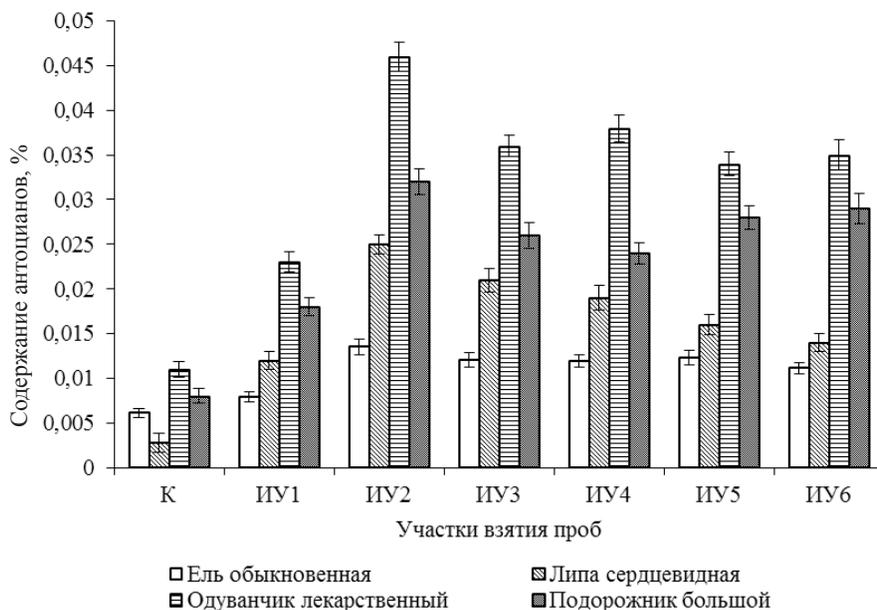


Рис. 2. Содержание антоцианов в исследуемых растениях фонового (К) и экспериментальных участков (ИУ1–ИУ6) с различным уровнем атмотехногенного загрязнения

Оценка суммарной антиоксидантной активности растений городской среды в условиях атмотехногенного загрязнения показала, что содержание водорастворимых антиоксидантов снижалось с увеличением интенсивности движения автотранспорта и ростом уровня загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами. В условиях минимальных антропогенных нагрузок со стороны автодорожной геотехнической системы уровень водорастворимых антиоксидантов был значительно выше антиоксидантного статуса растений городских фитоценозов. В условиях максимального загрязнения автомобильными выхлопами (ИУ2) антиоксидантный статус в исследуемых растениях был ниже фонового в хвое ели и листьях липы в 7,4–7,8 раза, в листьях одуванчика – в 4,8, в листьях подорожника – в 6,3 раза (рис. 3).

Как показывают результаты наших исследований, уровень загрязнения воздуха в г. Калининграде характеризуется высоким содержанием в нем основных загрязнителей, неблагоприятно влияющих на здоровье человека. На сегодняшний день самым значительным источником загрязнения воздушного бассейна и негативного влияния на окружающую среду, в том числе на

почву и зеленые насаждения, является автотранспорт, обладающий низкими эксплуатационно-техническими характеристиками. Калининград по этому показателю входит в список городов, где выбросы автотранспорта превышают более 50 тыс. т/год [8].

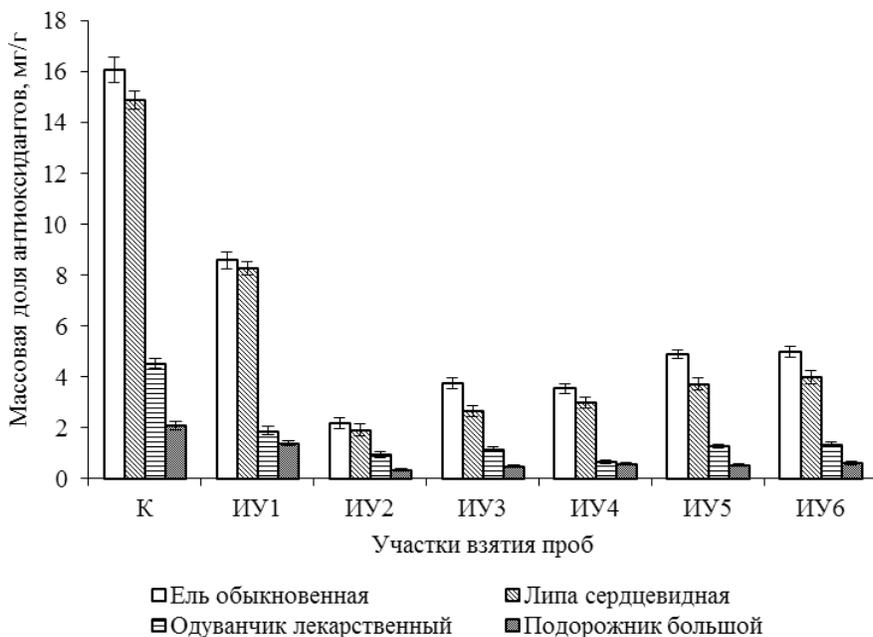


Рис. 3. Содержание водорастворимых антиоксидантов в исследуемых растениях фонового (К) и экспериментальных участков (ИУ1–ИУ6) с различным уровнем атмотехногенного загрязнения

Деревья, кустарники и травянистые растения разделительных полос транспортных магистралей и прилегающие к дорогам участки находятся под совокупным влиянием промышленных и транспортных эмиссий, повышенных рекреационных нагрузок в местах нерегулируемых переходов, применения антигололедных средств [15]. Оценка исследуемых растений, произрастающих вблизи транспортных магистралей г. Калининграда, свидетельствует о различном их состоянии, которое определяется как факторами воздействия выбросов, так и уровнем подготовки городских почвогрунтов, устойчивостью зеленых насаждений. Вследствие повышенных выбросов автотранспорта фиксируются побурение листовых пластинок, разреженность крон, более раннее пожелтение и опадание листвы деревьев, снижение декоративных качеств в целом. Комплексное загрязнение почв транспортных магистралей тяжелыми металлами, нефтепродуктами, пестицидами, антигололедными средствами и т.п., изменение физических параметров почв (плотности, аэрации, водоудерживающей способности), влияние вибрации,

электрических и магнитных полей отрицательно сказываются на состоянии древесных и травянистых растений.

Проведенные нами исследования показывают, что высокий уровень загрязнения автомобильными поллютантами способствует снижению процессов накопления фотосинтетических пигментов, изменяет соотношение их спектральных форм в исследуемых растениях ели обыкновенной, липы сердцевидной, одуванчика лекарственного и подорожника большого. Поллютанты способствуют ослаблению процессов накопления хлорофилла *b* в большей степени, чем хлорофилла *a*, увеличивают соотношение *a/b* (в листьях подорожника показатель *a/b* не имел достоверных различий по сравнению с фоном). В растительных тканях, за исключением липы, показано снижение величины отношения суммы зеленых пигментов к сумме желтых (13–80%). Сходный характер реакции пигментной системы древесных растений на атмотехногенное загрязнение отмечен ранее в ряде работ [5, 16, 17], в которых также отмечается, что высокий уровень поллютантов вызывает торможение и разрушение фотосинтетических пигментов и только при слабом неповреждающем влиянии наблюдается стимуляция их новообразования. Согласно принципу множественности адаптаций она реализуется тем эффективнее, чем больше имеется первичных приспособительных реакций [18]. Однако, как показали наши исследования, их одновременное включение ограничивается в условиях атмосферного загрязнения энергетическими возможностями растений. Снижение накопления фотосинтетических пигментов и их деструкция, несомненно, приводят к изменению активности фотосинтетического аппарата, скорости накопления ассимилятов и вследствие этого – к снижению содержания водорастворимых антиоксидантов. Снижение антиоксидантного статуса растений в конечном итоге отражается на их росте и продуктивности и может привести к ранней гибели растительного организма.

В отличие от хлорофиллов и водорастворимых антиоксидантов антоцианы реагируют на атмотехногенное загрязнение иначе. С увеличением степени загрязнения атмосферы их уровень в исследуемых растениях увеличивается. Активация их биосинтеза может быть вызвана накоплением метаболитов фотолиза (супероксидный радикал, перекись водорода и синглетный кислород) вследствие действия различных фотосенсибилизаторов, например рибофлавина или его дериватов, уровень которых возрастает под действием поллютантов [19].

Флавоноид-пероксидазная система, локализованная в вакуолях клеток, может оказывать существенную помощь в защите клетки от окислительного стресса. В отличие от других активных видов кислорода перекись водорода стабильна. Несмотря на относительно слабую токсичность и даже пользу в нейтрализации вирусов и бактерий, в присутствии супероксидного радикала (O_2^-) перекись индуцирует образование высокореактивного гидроксильного радикала. Таким образом, нейтрализация H_2O_2 антоциановыми пигментами позволяет избежать сильного окислительного стресса, возникающего в

результате действия атмосферных поллютантов. Способность антоцианов разрушать супероксидный радикал по типу флавонолов (наличие свободных гидроксильных групп определяет реакционную способность) позволяет им функционировать как эндогенным антиоксидантам, уменьшающим кислородно-радикальную токсичность, дополнять или компенсировать недостаток таких эндогенных антиоксидантов, как глутатион, флавонолы или аскорбат [6], выступая в качестве донора электронов для пероксидазной реакции [20]. Кроме этого, уровень антоциановых пигментов может использоваться в качестве индикатора или для определения уровня O_2^- и активности супероксиддисмутазы (СОД) [20].

Одним из наиболее токсичных загрязнителей окружающей среды является кадмий [21]. Для кадмия характерны высокая подвижность в почвенном растворе и быстрое поступление в растения. Накапливаясь в органах и тканях, кадмий негативно влияет на многие стороны метаболизма, а также на продуктивность растений [22]. В частности, под воздействием высоких концентраций этого металла у растений замедляются рост и развитие, нарушается водный и минеральный обмен, изменяется интенсивность фотосинтеза и дыхания [23, 24]. Кадмий способствует также избыточному образованию активных форм кислорода (АФК) и возникновению окислительного стресса [23, 25].

Анализ данных по содержанию кадмия позволил выявить положительную корреляционную зависимость между его содержанием в растительных тканях исследуемых растений и интенсивностью движения автотранспорта ($r \approx 0,7-0,88$). Высокая корреляционная зависимость свидетельствует о значительном вкладе автомобильных выбросов в превышение фонового уровня кадмия в растениях урбофитоценозов г. Калининграда. Присутствие ионов кадмия в коре растений свидетельствует об активном его участии в трансграничном переносе и наличии локальных источников антропогенного загрязнения. Так, например, среднегодовое перемещение кадмия с 1996 по 2000 г. над территорией Калининградской области превысило $50 \text{ мкг/м}^2\text{год}$. Варьирование абсолютных значений выпадения кадмия с атмосферными осадками по данным HELCOM в 1999–2000 гг. составило от 2 до $218 \text{ мкг/м}^2\text{год}$ [26].

Для защиты от избытка АФК в клетке существует многокомпонентная антиоксидантная система, включающая высокомолекулярные и низкомолекулярные антиоксиданты. К высокомолекулярным антиоксидантам относится ряд ферментов, среди которых основная роль в элиминации АФК принадлежит СОД. Низкомолекулярные антиоксиданты представлены разнообразными веществами, к числу которых относятся и фенольные соединения [27]. Снижение уровня водорастворимых антиоксидантов и наличие высокой отрицательной корреляционной связи ($r \approx -0,91$) между содержанием Cd и АОА в растительных тканях позволяют предположить, что в зависимости от интенсивности стрессового воздействия включаются те или иные компоненты антиоксидантной системы защиты. При низких концен-

трациях кадмия «запускается» низкомолекулярная компонента, а именно – увеличение синтеза фенольных соединений, а при более высокой – высокомолекулярная, когда возрастает активность СОД и стимулируются процессы накопления антоциановых пигментов. Активация накопления антоциановых пигментов в условиях токсического действия кадмия, а также высокая положительная корреляционная зависимость между содержанием Cd и накоплением антоцианов в вакуолях ($r \approx 0,92$) исследуемых растений позволяет отнести их биосинтез к неспецифическим механизмам адаптации растений к высоким концентрациям металла, а их содержание использовать в качестве теста, характеризующего реакцию растений на уровень загрязнения территорий ионами кадмия.

Большое разнообразие загрязняющих веществ, присутствующих в городских экосистемах, затрудняет решение вопроса об их экотоксикологической оценке. В последние годы значительное внимание уделяется разработке и внедрению в практику контроля качества природных сред методов биотестирования и биоиндикации. Наши исследования показали, что кора древесных растений липы и ели накапливает максимальное количество ионов кадмия по сравнению с вегетативной частью растений и ее можно использовать в качестве наиболее подходящего тест-объекта для биоиндикации загрязнения кадмием городских территорий. Среди травянистых растений в качестве растения-индикатора загрязнения кадмием городских почв подходит подорожник большой. Для комплексной экотоксикологической оценки состояния урбофитоценозов необходимо совместное применение биологических и физико-химических методов анализа. Используя биохимические показатели растений, такие как эндогенный уровень антоциановых пигментов, водорастворимых антиоксидантов, содержание фотосинтетических пигментов, можно эффективно оценить состояние урбофитоценозов и степень влияния на них автомобильных поллютантов, включая ионы кадмия.

Заключение

Загрязнение городской среды выбросами автотранспорта приводит к снижению накопления фотосинтетических пигментов и их деструкции, снижению скорости накопления ассимилятов и вследствие этого – к уменьшению содержания водорастворимых антиоксидантов у исследуемых растений. Снижение антиоксидантного статуса растений и активности фотосинтетического аппарата – симптомы неудовлетворительного состояния растений вследствие сильного разрушающего действия автомобильных поллютантов.

Показано превышение фонового содержания кадмия в растительных пробах г. Калининграда и выявлена положительная корреляционная связь между его содержанием в растениях и интенсивностью движения автотранспорта. Отмечена высокая отрицательная корреляционная связь между содержанием Cd в растениях и их антиоксидантным статусом и положительная

корреляция между содержанием Cd и накоплением антоцианов. Активное накопление антоцианов в вакуолях клеток может повысить эффективность антиоксидантной системы в процессах нейтрализации продуктов окислительного стресса и способствовать повышению устойчивости растений к действию кадмия.

Литература

1. Информационный бюллетень. Особенности состояния здоровья населения Калининградской области в связи с влиянием факторов среды обитания в 2008 г. / Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Калининградской области. Калининград, 2009. 41 с.
2. Станченко Л.Ю. Эколого-геохимическая оценка и типизация урбоэкосистем Калининграда и Светлогорска // Естественные и технические науки. 2008. № 6. С. 221–224.
3. Кин О.Н. Растительные сообщества в зоне промышленной разработки газа и аккумуляции ими тяжелых металлов // Экология. 2008. № 4. С. 269–275.
4. Зотикова А.П., Бендер О.Г., Собчак Р.О., Астафурова Т.П. Сравнительная оценка структурно-функциональной организации листового аппарата хвойных растений на территории г. Горно-Алтайска // Вестник Томского государственного университета. 2007. № 299(1). С. 197–200.
5. Тужилкина В.В. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение // Экология. 2009. № 4. С. 243–248.
6. Чупахина Г.Н. Система аскорбиновой кислоты растений. Калининград : Изд-во КГУ, 1997. 120 с.
7. Латин А.А., Борисенков М.Ф., Карманов А.П. и др. Антиоксидантные свойства продуктов растительного происхождения // Химия растительного сырья. 2007. № 2. С. 79–83.
8. Куркина М.В., Дедков В.П., Климова Н.Б. и др. Новые данные о некоторых группах микроорганизмов в почвах города Калининграда // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2009. Вып. 7. С. 90–98.
9. Yargholi B., Azimi A.A., Baghvand A. et al. Investigation of Cadmium Absorption and Accumulation in Different Parts of Some Vegetables // American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. 2008. Vol. 3, № 3. P. 357–364.
10. Ивлиева О.В. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Геоэкологический мониторинг». Ростов-на-Дону : Изд-во РГУ, 2002. 18 с.
11. Полевой В.В., Максимова Г.Б. Методы биохимического анализа растений. Л. : Изд-во ЛГУ, 1978. 192 с.
12. Дедков В.П., Масленников П.В., Гребенев Н.Н. Содержание антоцианов как показатель нефтяного загрязнения растений и растительных сообществ дюн Куршской косы // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2006. № 1. С. 102–108.
13. Яшин А.Я., Яшин Я.И. Новый прибор для определения антиоксидантной активности пищевых продуктов, биологически активных добавок, растительных лекарственных экстрактов и напитков // Приборы и автоматизация. 2004. № 11. С. 45–48.
14. Экологический атлас г. Калининграда. СПб. : НИИ Атмосфера, 2002. 11 карт.
15. Капелькина Л.П., Бадина Т.Б., Бакина Л.Г. Экологическая оценка почв и зеленых насаждений на транспортных магистралях Санкт-Петербурга // Экологизация автомобильного транспорта : тр. Всерос. науч.-практ. семинара. СПб., 2008. С. 82–85.
16. Гирс Г.И. Физиология ослабленного дерева. Новосибирск : Наука, 1982. 255 с.
17. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде. Минск : Наука и техника, 1989. 208 с.

18. Усманов И.Ю., Рахманкулова З.Ф., Кулагин А.Ю. Экологическая физиология растений. М. : Логос, 2001. 223 с.
19. Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Адаптация растений к нефтяному стрессу // Экология. 2004. № 5. С. 330–335.
20. Yamasaki H., Uefuji H., Sakihama Y. Bleaching of the red anthocyanin induced by superoxide radical // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1996. Vol. 332. P. 183–186.
21. Шишлова Н.А., Христофорова Н.К. Оценка загрязнения приземного воздуха города Усурийска по содержанию тяжелых металлов в одуванчике лекарственном // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2009. № 4. С. 81–84.
22. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнима Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.
23. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л. : Агропромиздат, 1987. 142 с.
24. Масленников П.В., Фролов Е.М. Исследование физиологических механизмов формирования устойчивости растений озимой ржи (*Secale cereal L.*) к токсическому действию CdCl₂ // Инновации в сельском хозяйстве : межвуз. сб. науч. тр., посвященный 15-летию высшего аграрного образования в КГТУ. Калининград : Изд-во ФГОУ ВПО КГТУ, 2010. Ч. 1. С. 113–119.
25. Холодова В.П., Волков К.С., Кузнецов В.В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации // Физиология растений. 2005. Т. 52, № 6. С. 848–858.
26. Королева Ю.В. Биоиндикация атмосферных выпадений тяжелых металлов на территории Калининградской области // Вестник РГУ им. И. Канта. 2010. № 7. С. 39–44.
27. Николаева Т.Н., Гончарук Е.А., Загоскина Н.В. Влияние кадмия на антиоксидантную систему клеток высших растений // Биоантиоксидант : материалы докл. VIII междунар. конф. М. : РУДН, 2010. С. 235–236.

Поступила в редакцию 13.09.2011 г.

Tomsk State University Journal of Biology. 2012. № 2 (18). P. 171–185

doi: 10.17223/19988591/18/18

**Galina N. Tchoupakhina, Pavel V. Maslennikov,
Lubov N. Skrypnik, Margarita I. Besserezhnova**

Immanuel Kant State University of Russia, Kaliningrad, Russia

REACTION OF PIGMENTAL AND ANTIOXIDANT SYSTEMS OF PLANT ON ENVIRONMENTAL POLLUTION OF KALININGRAD BY MOTOR TRANSPORT EMISSION

This work was carried out with the support of IKSUR grant (project № 01-004-09)

The atmospheric air of Kaliningrad on a compound of pollutants is typical for modern cities with the educed transport infrastructure. A specific weight of exhaust from a municipal motor transport in total anthropogenic atmospheric emission is 83,8%, exceeding more than in 6 times exhaust from stationary sources. Researches of city phytocenosis plants have shown, that the efficient control quality of an urban environment requires the sufficient information on an ekologo-physiological state of the city phytocenosises, allowing to estimate the functional contribution of each plant to change of quality of an urban environment to a direction of its enriching. In this

connection, the assessment of influence of motor transport exhaust on a state of urban ecosystems gets now exclusively great value. The authors identified six permanent sample plots in the city of Kaliningrad, sites were located in roadside areas (up to 5 meters from the road) on the major highways of the regional center. Sample plots were divided based on an assessment of urban environment and were in different parts of the city. Control site was located at a considerable distance from the city limits (40 km), in the «National park Curonian Spit». To the biogeochemical test were used most commonly in urban landscapes species of trees and herbaceous plants: spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), tilleul (*Tilia cordata* Mill.), dandelion (*Taraxacum officinale* Webb.), waybread (*Plantago major* L.). Collection of material (bark, pine needles, leaves) was carried out during the growing season (June-July) 2009. In plants, the authors determined the content of chlorophyll a and b, carotenoids spectrophotometry without prior separation of the 100% acetone extract. The authors determined the mass concentration of antioxidant (AOA) in the samples, equivalent to quercetin, amperometric method on the device «Color Yauza 01-AAA» («Himavtomatika», Russia) by the method of Yashin Y.I. This article analyses the pigment and antioxidant systems reaction of city phytocenosis plants of Kaliningrad in the conditions of environmental pollution by motor transport exhaust. The authors determined excess of the background content of cadmium in Kaliningrad plants and positive correlation between its content in plants and intensity of locomotion of motor transport and revealed the high negative correlation communication between content of Cd and the antioxidant status of plants and positive correlation with the anthocyanin content. This article contains data the content of photosynthetic pigments in plants in the conditions of environmental pollution by motor transport exhaust. Depression of the antioxidant status and activity of the photosynthetic apparatus are symptoms of an unsatisfactory state of plants, owing to strong destructive action of automobile pollutants. The active accumulation of anthocyanins in vacuoles of cells can raise efficacy of antioxidant system in processes of neutralization of products of oxidative stress and promote rising of plants resistance to cadmium action.

Key words: technogenic pollution; cadmium; city phytocenosis; antioxidants; bioindication.

Received September 13, 2011