

**Г. Н. Чупахина, П. В. Масленников, Е. Ю. Мальцева,
Е. М. Фролов, М. И. Бессережнова**

АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КАДМИЕМ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Изучено накопление антиоксидантов (водорастворимые антиоксиданты, каротиноиды, антоцианы) в растениях в условиях загрязнения кадмием городской среды. Показано превышение фонового содержания кадмия в растительных пробах Калининграда и выявлена положительная корреляционная связь между содержанием элемента в растениях и интенсивностью движения автотранспорта, а также высокая отрицательная корреляционная связь между содержанием Cd в растениях и их антиоксидантным статусом и положительная корреляция между содержанием Cd и накоплением антоцианов.

This article analyses the level of antioxidants (water-soluble antioxidants, carotenoids, and anthocyanins) in plants under the conditions of environmental cadmium pollution. The authors emphasise excessive background concentration of cadmium in plant samples collected in Kaliningrad and note a positive correlation between cadmium concentration and traffic intensity. A negative correlation between the Cd content and the antioxidative status of plants and a positive one with the anthocyanin content were established in the course of research.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, окислительный стресс, кадмий, антиоксиданты, биоиндикация.

Key words: technogenic pollution, oxidative stress, cadmium, antioxidants, bio-indication.



Автотранспорт – необходимое условие функционирования современного индустриального общества. Наряду с преимуществом, которое обеспечивает обществу развитая транспортная сеть, ее прогресс сопровождается негативным воздействием на окружающую среду. Оказывая техногенное воздействие на почвенный покров, она трансформирует его, изменяет направления почвообразовательных процессов и свойства почв, загрязняет их поллютантами, в частности тяжелыми металлами. Особенно выражено такое загрязнение в крупных промышленных городах [1].

Во многих районах Калининграда естественный почвенный покров существенно преобразован, ненарушенные почвы сохранились только в городских лесах, парках. В связи с увеличением количества личного автотранспорта на дорогах областного центра наибольшему техногенному воздействию в настоящее время подвержены почвы придорожных зон [2]. Одним из самых токсичных загрязнителей окружающей среды является кадмий. Его вклад в атмотехногенное загрязнение городских урбоэкосистем обусловлен в основном автомобильным транспортом [3]. Ионы кадмия обладают сильно выраженным отрицательным действием на все живые организмы, включая растения. Накапливаясь в органах и тканях, кадмий негативно влияет на многие стороны метаболизма, а также на продуктивность растений [4; 5]. Вместе с тем благодаря наличию механизмов устойчивости, действующих на разных уровнях организации, некоторые виды растений способны расти и развиваться без серьезных нарушений физиологических процессов в присутствии довольно высоких концентраций кадмия в окружающей среде [3]. Поиск таких растений, способных накапливать Cd в надземных органах в высоких концентрациях, представляет особый интерес с точки зрения фиторемедиации. Изучение последствий антропогенного загрязнения городской природной среды и связанного с ним техногенного накопления тяжелых металлов в растениях фитоурбоценозов в настоящее время приобретает исключительно важное значение. Поэтому цель данной работы – оценка антиоксидантного статуса растений в условиях атмотехногенного загрязнения кадмием городской среды. Для реализации указанной цели определялось суммарное содержание антиоксидантов фенольного типа, оценивался уровень некоторых антиоксидантов (каротиноидов, антоцианов) в индикаторных видах древесных и травянистых растений городской среды в условиях воздействия различной интенсивности движения автотранспорта.

В качестве объектов исследования использовались наиболее распространенные виды древесных и травянистых растений урбоэкосистем Калининграда. У ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.), одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Webb.), подорожника большого (*Plantago major* L.) определялось содержание кадмия методом атомно-абсорбционной спектроскопии (Varian AA 240 FS) [6]. Сбор материала (кора, хвоя, листья) проводился на исследовательских участках (ИУ) в течение 2009 г. Для изучения были заложены шесть постоянных пробных площадок на территории



Калининграда на основных автомагистралях областного центра. Контрольный участок располагался на значительном удалении от городской черты (более 40 км) на территории национального парка «Куршская коса». В исследуемых растениях содержание антоциановых пигментов, каротиноидов определялось спектрофотометрически [7], а суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов (АОА) – амперометрическим методом на приборе «Цвет Яуза 01-ААА» по методике Я.И. Яшина [8]. Содержание изучаемых веществ приведено на грамм сухого веса. Полученные данные обработаны статистически, различия в обсуждаемых данных между фоном и ИУ достоверны при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Территория Калининграда характеризуется различным уровнем загрязнения, степень которого на пробных участках оценивалась по показателям интенсивности движения автомобильного транспорта. Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха выявлено на основных автомагистралях города с высокой интенсивностью движения автотранспорта. Суммарная оценка загруженности улиц показала, что низкая интенсивность движения автотранспорта наблюдалась только на контрольном участке (168 авт./ч), средняя интенсивность – на ИУ 1 (252 авт./ч), высокая – на ИУ 5 (840 авт./ч). Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха (по концентрации СО) представлена в таблице 1. Максимальный уровень интенсивности движения автотранспорта (1784–1794 авт./ч) и загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами (36,4–39,6 мг/м³) выявлены на ИУ 2 и ИУ 3.

Таблица 1

Комплексная оценка атмотехногенного загрязнения пробных участков Калининграда и фонового (контроль)

ИУ	Концентрация загрязняющих веществ в 10 м от проезжей части, ПДК	Интенсивность движения автотранспорта, авт./ч	СО, мг/м ³	Оценка состояния городской среды, зоны
Фон	<1	168	1,9	Относительно чистая
1	1–1,5	252	3,5	Умеренно загрязненная
2	3–4	1784	39,6*	Грязная*
3	2–3	1794	36,4*	Очень грязная*
4	3–4	1374	28,1*	Умеренно загрязненная
5	2–3	840	17,3*	Умеренно загрязненная
6	1,5–2	1224	25,1*	Загрязненная*

* Загрязнение, превышающее действующие нормативы [2].

Анализ данных по содержанию кадмия в растениях выявил значительное превышение фонового уровня этого металла. Максимальное накопление кадмия наблюдалось у растений на ИУ 2: 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 обычно-



венной — в 3,4 и 3,1 раза соответственно. Содержание ионов кадмия в листьях одуванчика лекарственного и подорожника большого на ИУ 2 в среднем было выше контрольного уровня в 4,3 и 2,7 раза (рис.). У древесных растений наибольшее накопление кадмия наблюдалось в коре: у сосны содержание элемента в среднем было выше на 25 %, у липы — на 45 % по сравнению с его содержанием в листьях и хвое данных растений. Факт наибольшего накопления ионов кадмия в коре древесных растений позволяет использовать ее как наиболее подходящий тест-объект для биоиндикации загрязнения рассматриваемым металлом территорий урбозкосистем.

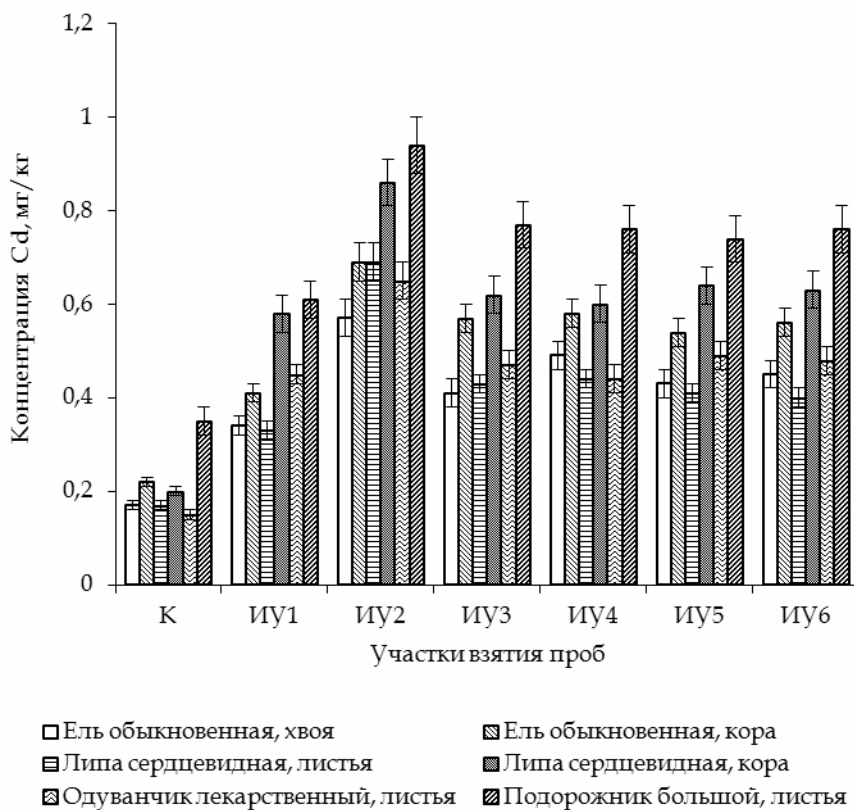


Рис. Концентрация ионов кадмия в исследуемых растениях фонового (К) и экспериментальных участков (ИУ 1 – ИУ 6) с различным уровнем антропогенного загрязнения

Полученные данные позволили выявить положительную корреляционную зависимость между содержанием металла 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.



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 мкг/м²·г. Варьирование абсолютных значений выпадения этого металла с атмосферными осадками по данным HELCOM в 1999–2000 гг. составило от 2 до 218 мкг/м²·г. [9].

Оценка реакции исследуемых растений на воздействие антропогенного загрязнения на уровне антиоксидантной системы показала, что содержание водорастворимых антиоксидантов снижалось с увеличением интенсивности движения автотранспорта и ростом уровня загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами. Наибольшее содержание водорастворимых антиоксидантов фенольного типа в исследуемых растениях наблюдалось в пробах Куршской косы (контроль). В условиях максимального загрязнения (ИУ 2) содержание водорастворимых антиоксидантов в растениях было ниже фонового в хвое ели и листьях липы в 7,4–7,8 раза, в листьях одуванчика – в 4,8 раза, в листьях подорожника – в 6,3 раза (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание водорастворимых антиоксидантов
в растениях фонового и экспериментальных участков
с различным уровнем антропогенного загрязнения**

ИУ	Вид растений			
	Ель обыкновенная	Липа сердцевидная	Одуванчик лекарственный	Подорожник большой
<i>АОА, мг/г</i>				
Фон	16,07±0,49	14,89±0,34	4,53±0,21	2,09±0,17
1	8,58±0,35	8,28±0,27	1,88±0,15	1,4±0,09
2	2,17±0,21	1,91±0,23	0,95±0,12	0,33±0,04
3	3,74±0,23	2,65±0,2	1,15±0,09	0,5±0,04
4	3,55±0,19	2,99±0,22	0,64±0,07	0,57±0,05
5	4,89±0,18	3,73±0,24	1,27±0,08	0,53±0,04
6	4,98±0,21	3,98±0,25	1,35±0,09	0,61±0,07

В отличие от водорастворимых антиоксидантов антоцианы реагируют на антропогенное загрязнение иначе. С увеличением степени загрязнения атмосферы их уровень в растениях увеличивается. В условиях максимального загрязнения (ИУ 2) содержание антоцианов в хвое ели и листьях липы превышало аналогичный уровень в контрольных растениях в 2,2 и 8,9 раза, в листьях одуванчика и подорожника – в 4,2 и 3,8 раза соответственно (табл. 3). Изучение пула каротиноидов выявило видоспецифичность в их накоплении в исследуемых растениях. В хвое ели и листьях липы их содержание уменьшалось в 1,5 и 3,2 раза (ИУ 2), в растениях подорожника изменялось незначительно, а в листьях одуванчика лекарственного их уровень был выше в 1,2 раза по сравнению с контрольным.



Таблица 3

**Содержание антиоксидантов в растениях
фонового и экспериментальных участков с различным уровнем
атмотехногенного загрязнения**

ИУ	Вид растений			
	Ель обыкновенная	Липа сердцевидная	Одуванчик лекарственный	Подорожник большой
<i>Содержание антоцианов, $\times 10^{-3}\%$</i>				
Фон	6,1±0,5	2,8±0,6	11,2±0,9	8,5±0,8
1	7,9±0,6	12,1±0,9	23,1±1,1	18,1±1,2
2	13,5±0,9	24,9±1,1	46,8±1,6	32,4±1,5
3	12,1±0,8	21,3±1,3	36,4±1,2	26,3±1,4
4	11,9±0,7	19,1±1,4	38,8±1,5	24,7±1,2
5	12,3±0,8	16,4±1,1	34,7±1,3	28,1±1,3
6	11,1±0,6	14,2±1,1	35,2±1,7	29,1±1,7
<i>Содержание каротиноидов, мг/г</i>				
Фон	2,59±0,19	0,58±0,03	1,11±0,09	0,84±0,05
1	1,72±0,12	0,52±0,03	0,91±0,08	0,63±0,04
2	1,76±0,13	0,18±0,01	1,36±0,1	0,72±0,04
3	1,51±0,12	0,25±0,02	1,25±0,1	0,69±0,03
4	1,55±0,11	0,21±0,01	1,28±0,1	0,64±0,04
5	1,11±0,1	0,21±0,01	1,29±0,09	0,71±0,04
6	1,54±0,12	0,22±0,02	1,3±0,1	0,69±0,03

21

Усиление уровня атмотехногенного загрязнения окружающей среды с увеличением интенсивности движения автотранспорта приводит к накоплению ионов кадмия в растительных тканях исследуемых растений. Необходимое условие устойчивости растений к токсическому действию Cd – изолирование его избыточного количества от зон активного метаболизма. Это может осуществляться как путем детоксикации Cd непосредственно в цитозоле, так и его компартментацией в вакуоли [5]. Высокая отрицательная корреляционная связь ($r \approx -0,91$) между содержанием Cd и АОА в растительных тканях говорит о том, что включение первичных приспособительных реакций ограничено энергетическими возможностями растений. В этих условиях активное накопление антоцианов в вакуолях клеток может повысить эффективность антиоксидантной системы в процессах нейтрализации продуктов окислительного стресса и способствовать повышению устойчивости растений к действию поллютанта. 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 большим концентрациям металла, а их содержание использовать в качестве



теста, характеризующего реакцию растений на уровень загрязнения территорий ионами кадмия. Наличие высокой отрицательной корреляционной связи между содержанием водорастворимых антиоксидантов и антоцианов ($r \approx -0,9$) также говорит о том, что антоциановые пигменты — более продвинутые фотопротективные водорастворимые соединения, которые в противоположность другим флавоноидам почти всегда гликозилированы, что, вероятно, и позволяет им быть эффективнее в выполнении своих функций, находясь в вакуолярном резерве.

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

Список литературы

1. Ложкин В.Н. Загрязнение атмосферы автомобильным транспортом: справ.-метод. пособие. СПб., 2001.
2. 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.
3. Шишлова Н.А., Христофорова Н.К. Оценка загрязнения приземного воздуха города Уссурийска по содержанию тяжелых металлов в одуванчике лекарственном // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2009. №4. С. 81—84.
4. Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, №4. С. 26—33.
5. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнима Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск, 2007.
6. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия: ГОСТ 30692-2000. Минск, 2002.
7. Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Методы анализа витаминов: практикум. Калининград, 2004.
8. 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.
9. Королева Ю.В. Биоиндикация атмосферных выпадений тяжелых металлов на территории Калининградской области // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. №7. С. 39—44.

Об авторах

Галина Николаевна Чупахина — д-р биол. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: tchoupakhina@mail.ru

Павел Владимирович Масленников — канд. биол. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: pashamaslennikov@mail.ru

Елена Юрьевна Мальцева — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.



Евгений Михайлович Фролов – студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Маргарита Ивановна Бессережнова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

About authors

Prof. Galina N. Choupakhina – IKBFU, e-mail: tchoupakhina@mail.ru

Dr. Pavel V. Maslennikov – Associate Professor, IKBFU, e-mail: pasha-maslennikov@mail.ru

Yelena Yu. Maltseva – PhD Student, IKBFU.

Yevgeni M. Frolov – student, IKBFU.

Margarita Besserezhnova – PhD Student, IKBFU.