

# ЭКОЛОГИЯ

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕМЕНТОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМЫ АДАПТАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

И.Л. Бухарина

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия  
*ул. Студенческая, 11, Ижевск, Россия, 426069*

В работе отражены особенности динамики содержания неферментативных компонентов антиоксидантной системы адаптации (аскорбиновой кислоты и фенольных соединений (таннинов)) древесных растений, произрастающих в условиях интенсивной техногенной нагрузки.

Адаптация растений к стрессовым воздействиям в значительной степени определяется активностью антиоксидантной системы (АОС), которая обеспечивается определенным набором ферментов. Но при окислительном стрессе эта система может снижать и утрачивать свою эффективность, что связано с быстрой инактивацией конститутивного пула ферментов свободными радикалами, а также значительным временем для индукции их синтеза. Многие промышленные газы обладают свойствами сильных окислителей, адсорбируясь на поверхности мембраны и проникая через нее, они вызывают свободное радикальное окисление. Ряд других экстремальных факторов городской среды (засоление почв, низкие и высокие температуры, тяжелые металлы, активные соединения, инфекции, засуха и т.д.) также вызывает окислительное разрушение мембран. В таких условиях повышается значение низкомолекулярных неферментативных антиоксидантов растительных клеток (аскорбиновой кислоты, фенольных соединений, каротиноидов и др.) [2; 11; 13; 20].

В своей работе мы преследовали цель изучить динамику содержания аскорбиновой кислоты в листьях и фенольных соединений (таннинов) в побегах древесных растений, произрастающих в условиях интенсивной техногенной нагрузки.

**Объект и методы исследований.** В качестве объектов исследования использованы девять видов древесных растений, являющихся основными в озеле-

нении Ижевска (их удельный вес в общей площади насаждений составляет 70—80%), а также ель колючая (*Picea pungens* Engelm) как перспективный вид для зеленого хозяйства города. Ижевск является крупным промышленным центром с населением свыше 630 тыс. человек, развитой промышленностью, транспортной сетью и социальной инфраструктурой. Уровень загрязнения в городе соответствует среднестатистическим показателям городов России.

В магистральных посадках (ул. Удмуртская и К. Либкнехта) и насаждениях санитарно-защитных зон (СЗЗ) ведущих промышленных предприятий города (ОАО «Ижсталь», «Нефтемаш», «Буммаш», «Автозавод») на основании описания пробных площадей были отобраны учетные растения среднеговозрастного генеративного и удовлетворительного жизненного состояния [4; 16; 17]. Согласно методическим рекомендациям С.Н. Краснощековой [8], в качестве зон условного контроля (ЗУК) выбраны территории Ботанического сада УдГУ (северная окраина города) и городского парка ландшафтного типа (ЦПКиО им. С.М. Кирова) площадью 113 га, имеющего компактную нерасчлененную конфигурацию.

Для проведения лабораторных анализов из средней и нижней части кроны учетных древесных растений южной экспозиции отбирали пробы верхушечных вегетативных годичных побегов и на них же срединных листьев. Трижды в течение вегетации определяли содержание аскорбиновой кислоты в листьях (ГОСТ 24556-89, титрометрический метод). Исследования содержания танинов в побегах осуществляли в начале (март) и конце (сентябрь) вегетации растений по методу Нейбауэра—Лёвентала [14]. Повторность анализов трехкратная.

В местах отбора растительных образцов провели отбор почвенных проб [10] и анализ агрохимических и физических свойств почвы [15]. Анализы проводили в лаборатории агрохимического анализа ФГОУ ВПО «Ижевская ГСХА».

Математическую обработку материалов осуществляли с применением статистического пакета «Statistica 5,5», используя дисперсионный многофакторный анализ (по перекрестно-иерархической схеме, при последующей оценке различий методом множественного сравнения LSD-test) и корреляционный анализ (коэффициент Спирмена).

Характеристика степени загрязнения атмосферного воздуха и почв в местах произрастания растений проведена на основе опубликованных материалов Удмуртского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Геоэкологической лаборатории Удмуртского государственного университета.

По сравнению с пригородной и парковой зонами в санитарно-защитных зонах, и особенно вдоль магистралей, наблюдается умеренно опасный и опасный уровень загрязнения почв ( $Z_c = 16—32$  и  $32—128$ ), здесь же зафиксированы наиболее высокие значения комплексного индекса загрязнения атмосферы (ИЗА =  $8,8—9,4$ ). Изменяются агрохимические и физические свойства почв: содержание элементов минерального питания, возрастает значение рН, снижается влажность почв, увеличивается их плотность сложения. В магистральных посадках для почв характерно довольно высокое содержание ионов натрия, хлора, а также органических веществ. Среди промышленных предприятий наибольшая техно-

генная нагрузка характерна для санитарно-защитных зон предприятий «Ижсталь» (центральная промышленная зона, расположенная крайне неудачно в экологическом отношении), «Буммаш» и «Автозавод» (северо-восточная промышленная зона) [18]. Кроме наличия загрязняющих веществ неблагоприятным для древесных насаждений фактором (особенно в магистральных посадках) являются недостаток влаги, освещение в ночное время, значительная высота и плотность снежного покрова в зимний период.

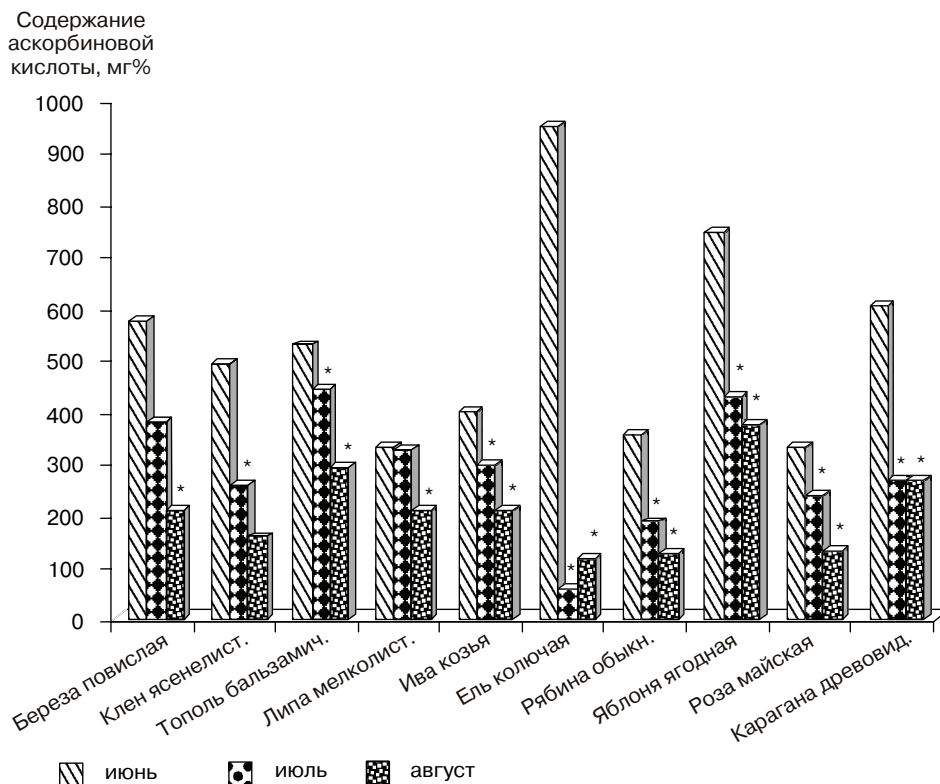
**Результаты исследований.** *Содержание аскорбиновой кислоты в листьях древесных растений.* Аскорбиновая кислота является хорошим восстановителем, в растительной клетке наряду с другими соединениями (глутатион, полифенолы, цитохромы и др.) участвует в регуляции окислительно-восстановительного потенциала, с которым связана активность многих ферментов и физиолого-биохимических реакций, в том числе таких жизненно важных, как фотосинтез и дыхание [9; 21].

На основе изучения динамики содержания аскорбиновой кислоты в листьях древесных растений под влиянием фумигации аммиаком и сернистым газом, а также в полевых испытаниях выявлено, что в условиях загрязненной окружающей среды у видов, устойчивых к антропогенному влиянию, содержание аскорбиновой кислоты снижается незначительно, у видов неустойчивых — с ослабленными процессами — значительно [11—13].

На клеточном уровне действие аскорбиновой кислоты рассмотрено С.П. Васфиловым [2]. Под влиянием кислых газов снижается рН симпласта листа, активизируя окислительно-восстановительные реакции, в которых принимает участие и аскорбиновая кислота. Ее молекула, присоединяя два протона, превращается в клетках в гидроаскорбиновую кислоту. Эта реакция обратима и тесно связана с реакцией окисления и восстановления глутатиона. Протон является нормальным метаболитом любой живой клетки. Из-за его высокой химической активности концентрация протонов в каждом внутриклеточном компартменте должна поддерживаться в определенных пределах. В случае низких доз кислых газов эта система может повышать устойчивость растений к токсикантам.

Таким образом, содержание аскорбиновой кислоты тесно связано с условиями произрастания и физиологическим состоянием растительного организма. В связи с этим полагают, что определение содержания аскорбиновой кислоты, а также изменчивость этого показателя можно использовать в биоиндикационных целях [12; 13; 21].

Дисперсионный анализ полученных нами результатов выявил существенность влияния видовых особенностей, условий места произрастания и сроков вегетации, а также их взаимодействия на содержание аскорбиновой кислоты в листьях древесных растений ( $P < 10—26$ ). В течение вегетации (июнь—август) наблюдается постепенное снижение содержания аскорбиновой кислоты (рис. 1), в среднем на 242,35 в июле и 320,50 мг% в августе (в июне оно составляет 528,84 мг%).



**Рис. 1.** Содержание аскорбиновой кислоты в листьях древесных растений в течение вегетации (г. Ижевск).

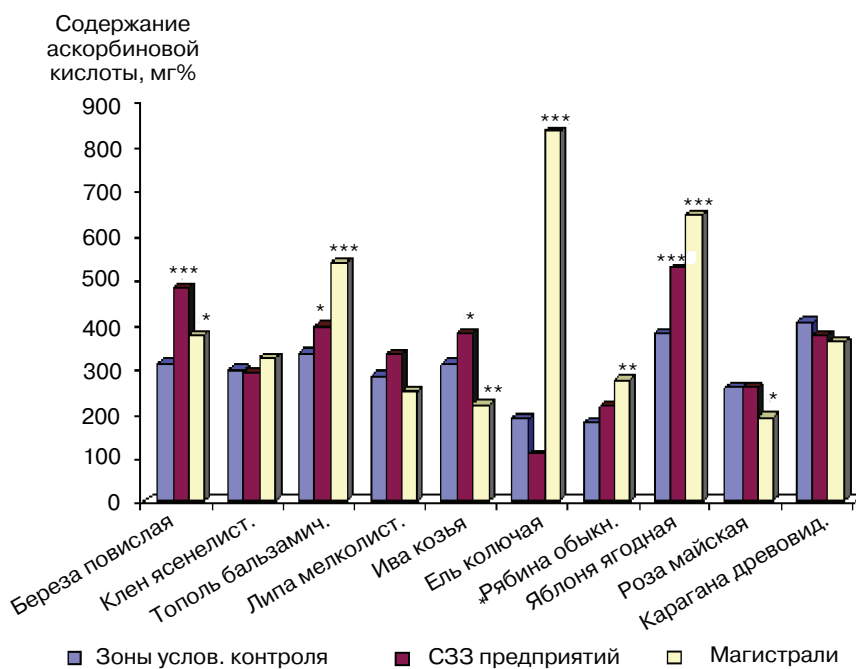
Примечание: достоверные отличия от зоны условного контроля при \* —  $P < 0,01$

При возрастании степени техногенной нагрузки отмечен достоверный рост содержания аскорбиновой кислоты: по сравнению с ЗУК (292,26 мг%) ее концентрация в СЗЗ промышленных предприятий увеличилась на 41,18, а в магистральных посадках — на 105,68 мг%. Это, безусловно, свидетельствует об участии данного метаболита в механизмах адаптации растений к условиям урбаноcреды. В целом в городских условиях наибольшее содержание аскорбиновой кислоты характерно для тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) и яблони ягодной (*Mallus baccata* L.) (420,18 и 514,03 мг% соответственно), наименьшее — для рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и розы майской (*Rosa majalis* Herrm.) (221,06 и 232,31 мг% соответственно).

С увеличением техногенной нагрузки, т.е. в ряду ЗУК — СЗЗ промпредприятий — магистрали, яблоня ягодная и тополь бальзамический (это виды с высокой ассимиляционной активностью в условиях Ижевска [1]) существенно увеличивают содержание аскорбиновой кислоты в листьях (рис. 2), что, на наш взгляд, может обуславливать их высокую устойчивость к загрязнению.

Интересна динамика содержания аскорбиновой кислоты в хвое ели колючей: если в июне данный вид содержит максимальное количество этого метаболита (948,93 мг%), то в июле и августе содержание аскорбиновой кислоты по срав-

нению с другими видами довольно низкое (54,86 и 116,82 мг%), что можно связать с расходом метаболита в процессе адаптации. Но, тем не менее, в августе содержание аскорбиновой кислоты в хвое достоверно выше, чем в июле, что говорит о некотором возрастании активности физиологических процессов в данный период и согласуется с данными по ассимиляционной активности вида. По степени изменчивости содержания аскорбиновой кислоты в листьях изучаемые виды древесных растений можно представить в виде следующего ряда: ель колючая > тополь бальзамический > яблоня ягодная > клен ясенелистный (*Acer negundo L.*) > рябина обыкновенная > ива козья (*Salix caprea L.*) > береза повислая (*Betula pendula Roth.*) > липа мелколистная (*Tilia cordata Mill.*) > роза майская и карагана древовидная (*Caragana arborescens Lam.*).



**Рис. 2.** Содержание аскорбиновой кислоты в листьях изучаемых видов древесных растений, произрастающих в насаждениях различных функциональных зон (г. Ижевск)

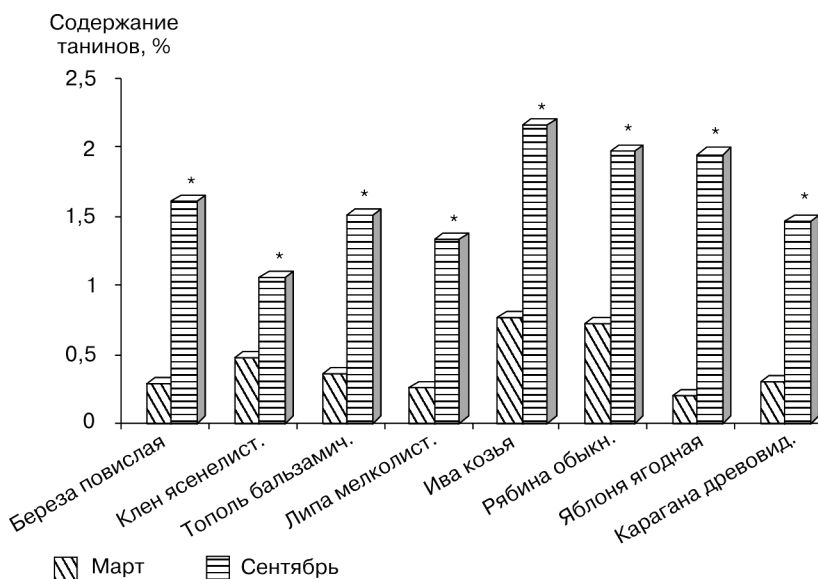
Примечание: достоверные отличия от зоны условного контроля при \* —  $P < 0,05$ ; \*\* —  $P < 0,01$ ; \*\*\* —  $P < 0,001$

*Содержание фенольных соединений (таннинов) в побегах древесных растений.* Фенольные соединения (ФС) влияют на процессы роста и развития. Механизм их действия на рост растений не ясен, часто его связывают с воздействием на ауксиновый обмен посредством регуляции количества ауксинов. Фенолы имеют общий с ИУК предшественник при биосинтезе, поэтому их синтез может быть связан с замедлением биосинтеза ауксина, и наоборот. Предполагается, что таннины являются основными антагонистами и регуляторами работы гиббереллинов [7; 9].

Фенолы участвуют в транспорте электронов при дыхании и фотосинтезе, в биосинтезе лигнина, обеспечивают неферментативное окисление ряда соединений (аминокислот, аскорбиновой кислоты, цитохромов и т.д.). Некоторые из фенолов нарушают окислительное фосфорилирование. При механических повреждениях тканей в них начинается интенсивное новообразование фенольных соединений, которое сопровождается окислительной конденсацией в поверхностных слоях, продукты которой несут защитную функцию. ФС играют важную роль в покое почек. При вхождении в состояние покоя концентрация фенолов в них возрастает и снижается при его завершении [3; 5; 6; 9; 23; 25; 26]. В растительной клетке ФС могут играть значимую роль в адаптации растений к различным стрессовым факторам [19; 22; 24].

Тем не менее, в настоящее время нет четкого понимания метаболизма этих соединений при воздействии на растения негативных факторов, и этот вопрос требует дальнейшего изучения.

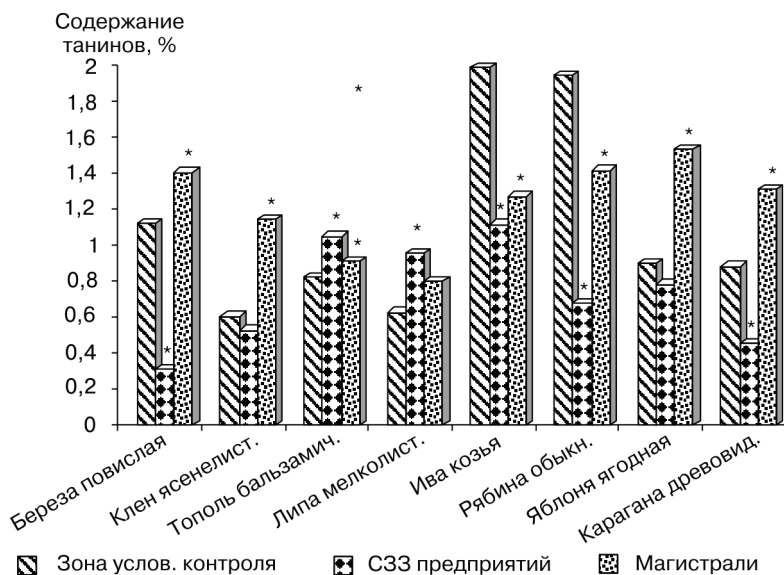
В начале вегетации (март) в побегах растений, произрастающих в СЗЗ промышленных предприятий и в магистральных посадках содержание таннинов существенно ниже такового в побегах деревьев в зонах условного контроля. В конце вегетации в каждой из исследуемых функциональных зон, а также в целом по городу наблюдается достоверный рост содержания таннинов в побегах растений (в среднем в 4 раза). К концу вегетации в побегах клена ясенелистного, ивы козьей и рябины обыкновенной концентрация данного метаболита возрастает в 2—3 раза, в побегах березы повислой, тополя бальзамического, липы мелколистной и караганы древовидной — в 4—6 раз. В побегах яблони ягодной отмечен максимальный рост данного метаболита — примерно в 10 раз (рис. 3). Достоверность различий статистически подтверждена.



**Рис. 3.** Содержание таннинов в побегах древесных растений в разные периоды вегетации (г. Ижевск)

Примечание: достоверные отличия от зоны условного контроля при \* —  $P < 0,01$

Видовая специфика содержания таннинов в побегах растений, произрастающих в различных функциональных зонах города, отражена на рис. 4. Наиболее четко особенности видовой реакции на увеличение степени техногенной нагрузки проявляются у яблони ягодной и клена ясенелистного (концентрация таннинов существенно увеличивается только в магистральных посадках, т.е. в условиях наиболее сильного загрязнения). Концентрация таннинов в побегах ивы козьей и рябины обыкновенной достоверно снижается в ряду ЗУК — магистральные посадки — СЗЗ промышленных предприятий. Следует отметить, что только у последних из всех изучаемых видов выявлена такая реакция.



**Рис. 4.** Содержание таннинов в побегах древесных растений, произрастающих в насаждениях различных функциональных зон (г. Ижевск)

Примечание: достоверные отличия от зоны условного контроля при \* —  $P < 0,01$

Методами корреляционного анализа нам удалось установить зависимость концентрации аскорбиновой кислоты в листьях и показателей содержания в воздухе  $CO$  ( $r = -0,13$ ,  $P = 0,001$ ,  $n = 648$ ),  $NO_2$  ( $r = 0,20$ ,  $P = 3,25 \cdot 10^{-7}$ ,  $n = 648$ ) и фенола ( $r = -0,11$ ,  $P = 0,041$ ,  $n = 357$ ). Исключение составляют тополь бальзамический, у которого концентрация данного метаболита не обнаруживает корреляционной зависимости с содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, и яблоня ягодная (значимая корреляция установлена лишь с содержанием  $NO_2$ ). Для клена ясенелистного, ивы козьей и рябины обыкновенной характерна отрицательная корреляционная связь содержания данного метаболита и концентрации  $CO$  в воздухе, а у липы мелколистной — наоборот, положительная. У розы майской количество аскорбиновой кислоты в листьях снижается при возрастании в воздухе содержания фенола.

Содержание таннинов в побегах рябины обыкновенной и караганы древовидной высокосignificantly коррелирует с ИЗА и его составляющими. Кроме того,

высокие корреляционные связи концентрации таннинов с содержанием в воздухе  $\text{NO}_2$  выявлены у клена ясенелистного ( $r = 0,42$ ,  $P = 0,044$ ,  $n = 24$ ), липы мелколистной ( $r = 0,47$ ,  $P = 0,049$ ,  $n = 18$ ), розы майской ( $r = 0,80$ ,  $P = 0,002$ ,  $n = 12$ ) и у березы повислой с содержанием бенз(а)пирена ( $r = 0,52$ ,  $P = 0,006$ ,  $n = 27$ ).

По результатам проведенных исследований можно заключить, что у древесных растений в условиях урбаноcреды активизируется роль низкомолекулярных компонентов антиоксидантной системы защиты, что проявляется в повышении содержания аскорбиновой кислоты в листьях, увеличении концентрации таннинов в побегах к концу вегетационного периода (причем у видов с высокой ассимиляционной активностью — в 4—10 раз). Изучаемые нами биохимические показатели отражают реакцию древесных растений на загрязнения атмосферного воздуха и отдельные загрязняющие вещества в его составе, их, безусловно, можно рекомендовать, как для оценки состояния насаждений, так и для системы оперативного мониторинга урбаноcреды.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бухарина И.Л., Поварницина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде: монография. — Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007.
- [2] Васфилов С.П. Возможные пути негативного влияния кислых газов на растения // Журнал общей биологии. — 2003. — Т. 64. — № 2. — С. 146—159.
- [3] Горбачева Т.Т., Артемкина Н.А., Лукина Н.В. Содержание полифенолов при разложении опада и подстилки в ельниках зеленомошниках Кольского полуострова // Лесоведение. — 2006. — № 3. — С. 15—23.
- [4] Гришина Л.А., Самойлова Е.М. Учет биомассы и химический анализ растений. — М.: МГУ, 1971.
- [5] Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. — М.: Мир, 1986.
- [6] Карасев В.Н. Физиология растений. — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001.
- [7] Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. — М.: Лесная промышленность, 1983.
- [8] Краснощекова Н.С. Эколого-экономическая эффективность зеленых насаждений: обзорная информация. — М.: ЦЕНТИ Минжилкомхоза РСФСР, 1987.
- [9] Кретович В.Л. Основы биохимии растений. — М.: Высшая школа, 1986.
- [10] Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами / Сост. В.А. Большаков, Ю.Н. Водяницкий, Т.И. Борисочкина и др. — М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1999.
- [11] Неверова О.А. Особенности изменений некоторых физиолого-биохимических и биофизических показателей у древесных растений в условиях промышленного города // Современные проблемы аграрной науки и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. — Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2005.
- [12] Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты. — Новосибирск: Наука, 2003.
- [13] Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. — Пушкино: ВНИИЛМ, 2002.
- [14] Папкина И.А. Методы интродукционного изучения растений. — Ижевск: УдГУ, 2002.
- [15] Практикум по агрохимии / Сост. Б.А. Ягодин, И.П. Дерюгин, Ю.П. Жуков и др. / Под ред. Б.Я. Ягодина. — М.: Агропромиздат, 1987.



- [16] Родин Л.Е., Релизов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. — Л.: Наука, 1968.
- [17] Смирнова О.В., Чистякова А.А., Попатюк Р.В. и др. Популяционная организация растительного покрова лесных территорий (на примере широколиственных лесов Европейской части России). — Пушкино, 1990.
- [18] Стурман В.И., Гагарин С.А. Промышленные источники: вклад в загрязнение и пути его снижения // Воздушный бассейн Ижевска / Под ред. проф. В.И. Стурмана. — Москва — Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2002. — С. 40—43.
- [19] Трошкова И.Ю., Винокурова Р.И. Особенности накопления бетулина и суберина в коре деревьев *Betula pendula*, произрастающих на территориях различного функционального использования // Современные проблемы аграрной науки и пути их решения: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. — Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2005. — С. 278—282.
- [20] Чиндяева Л.Н. Древесные растения — интродуценты в урбанизированной среде г. Новосибирска // Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов: Матер. междунар. конф. — Кемерово: КРЭОО «Ирбис», 2006. — С. 116—120.
- [21] Чупахина Г.Н. Система аскорбиновой кислоты растений. — Калининград: КГУ, 1997. — С. 90—120.
- [22] Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Адаптация растений к нефтяному стрессу // Экология. — 2004. — № 5. — С. 330—335.
- [23] Hattenschwiler S., Vitousek P.M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling // Trends in Ecology and Evolution, 2000. — V. 15. — P. 238—243.
- [24] Hoch W.A., Zeldin E.L., McCown B.H. Physiological significance of anthocyanin during autumnal leaf senescence // Tree Physiology. — 2001. — V. 21. — № 1. — P. 1—8.
- [25] Lorenz K., Preston C.M., Raspe S. and other. Litter decomposition and humus characteristics in Canadian and German spruce ecosystems: information from tannin analysis and <sup>13</sup>C CP/MAS NMR // Soil Biol. Biochem. — 2000. — V. 32. — P. 779—792.
- [26] Scalbert A. Antimicrobial properties of tannins // Phytochemistry. — 1991. — V. 30. — P. 3875—3883.

**THE CHARACTERISTIC OF ELEMENTS  
OF ANTIOXIDANT SYSTEM OF ADAPTATION  
OF WOOD PLANTS IN CONDITIONS  
OF THE CITY ENVIRONMENT**

**I.L. Buharina**

The Izhevsk State Agricultural Academy  
*Studencheskaya str., 11, Izhevsk, Russia, 426069*

In work features of dynamics of the maintenance not enzymatic components antioxidant systems of adaptation (an ascorbic acid and phenolic connections (tannins)) the wood plants growing in conditions of the city environment are reflected.