

ОСОБЕННОСТИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ЕЛИ КОЛЮЧЕЙ (*PICEA PUNGENS* ENGELM.) И ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*PICEA ABIES* L.) В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Бухарина И.Л.¹, Пашкова А.С.²

¹ ФГБОУ ВПО Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия (426034, Ижевск, ул. Университетская, 1), e-mail: rector@udsu.ru;

² ФГБОУ ВПО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия (426069, Ижевск, ул. Студенческая, 11), e-mail: info@izhgsha.ru

Городская среда отличается своеобразием экологических факторов, приводящих к значительным изменениям окружающей среды. Однако существует ряд видов древесных растений, устойчивых к городским условиям. Они могут служить своеобразными моделями изучения адаптивных реакций и более широко использоваться при создании насаждений на техногенных территориях. Исследования направлены на изучение формирования адаптивных реакций видов хвойных растений в условиях урбанизированной среды. Изучаемые виды древесных растений произрастали в насаждениях разных экологических категорий и испытывали антропогенную нагрузку разной степени интенсивности. Исследования динамики содержания фотосинтетических пигментов проводилось методом количественного определения хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в хвое растений на спектрофотометре СФ-200. Выявлены видовые особенности реакции пигментной системы у хвойных растений на условия техногенной среды, которые свидетельствуют о повышении содержания пигментов с антиоксидантной активностью у ели колючей (*Picea pungens* Engelm.). Во всех насаждениях в оба года исследований содержание хлорофилла *a* в хвое ели европейской было существенно ниже, чем у ели колючей. Одной из причин устойчивости ели колючей в городских условиях является стабильность и высокое содержание хлорофилла *a*.

Ключевые слова: хвойные растения, адаптивная реакция, урбаноэкосистема, хлорофиллы, каротиноиды.

ABOUT THE FEATURES OF THE PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF CONIFERS IN THE URBAN ENVIRONMENT

Bukharina I.L.¹, Pashkova A.S.²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Udmurt State University», e-mail: rector@udsu.ru;

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Izhevsk State Agricultural Academy», e-mail: info@izhgsha.ru

The urban environment is peculiar environmental factors leading to significant environmental changes. However, there are a number of species of woody plants in there are many tolerance woody plants in urban environmental. They can serve as models for studying adaptive responses and more widely used in the creation of plantations in the technogenic areas. The study aims to examine the formation of adaptive reactions coniferous plants in urban environment. The studied tree species grown in plantations in different environmental categories and have experienced anthropogenic load of varying intensity. Studies of the dynamics of the content of photosynthetic pigments was carried out by the method of quantitative determination of chlorophylls *a*, *b* and carotenoids in needles of plants on the spectrophotometer SF-200. Identified specific features of the reaction of the pigment system in conifers in the conditions of technogenic environment, which indicate the increase in the content of pigments with antioxidant activity eating razor (*Picea pungens* Engelm.). All plantings in both years of studies, the chlorophyll *a* content in needles of Norway spruce was significantly lower than eating razor. One of the reasons eating razor sustainability in the urban environment is the stability and high chlorophyll *a* content.

Keywords: conifers, adaptive response, urban environment, chlorophylls, carotenoids.

Система озеленения является основным звеном экологического каркаса города, поэтому изучение процессов роста и развития как отдельных деревьев, так и насаждений в урбаносреде является актуальной задачей.

В настоящее время в озеленении городов недостаточно используются хвойные растения, среди которых имеются виды с высокой декоративностью и устойчивостью к неблагоприятным условиям городской среды.

Изучение древесных растений в г. Ижевске проводится с 2000 г., но в основном изучались лиственные породы и доминирующие в травянистом покрове виды растений. В отдельных районах города изучались некоторые показатели хвойных растений, которые свидетельствовали о хорошем жизненном состоянии ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) в городских насаждениях, при этом авторы исследований указывали на необходимость изучения особенностей адаптивных реакций у этого вида в урбаносреде [1, 2]. Но изучение биоэкологических особенностей пигментной системы хвойных интродуцентов в условиях города ранее не проводилось.

Наиболее чувствителен к факторам внешней среды процесс фотосинтеза, он тесно связан с физиологическим состоянием листьев и растения в целом, а также с условиями произрастания растения. Считается, что хвойные древесные растения по интенсивности фотосинтеза в расчете на единицу площади листовой поверхности уступают травянистым растениям. Низкая интенсивность фотосинтеза компенсируется за счет более продолжительного вегетационного периода и большого количества листьев (хвои). Листья распределяются в кроне дерева таким образом, что достигается максимальное использование энергии света. Факторами, снижающими фотосинтетическую активность древесных растений в условиях загрязнения атмосферы, являются пыль и сажа в воздухе, действие которых проявляется в закупоривании устьиц, задержке поглощения CO₂ и изменении оптических свойств и теплового баланса листа [3–5]. Показателем, характеризующим ассимиляционную активность растений, является содержание фотосинтетических пигментов, а адаптивные реакции проявляются в изменении соотношения между содержанием хлорофиллов и других пигментов, участвующих в процессе фотосинтеза. Более того, считается, что некоторые из этих пигментов (например, каротиноиды) выполняют важную роль в системе антиоксидантной защиты растений в условиях техногенного стресса.

Целью наших исследований являлось изучение особенностей изменения фотосинтетического аппарата хвойных растений в насаждениях разных экологических категорий в условиях урбаносреды. Научная новизна исследований заключается в расширении представлений о формировании адаптивных реакций пигментной системы у двух хвойных пород – ели европейской (*Picea abies* L.) и ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) – в условиях техногенного стресса.

Объекты и методы исследований

Исследования хвойных пород проводили в г. Ижевске Удмуртской Республики. Объектами исследования явились ель колючая – интродуцированный вид – и ель европейская – аборигенный вид. Изучаемые виды древесных растений произрастали в насаждениях различных экологических категорий, расположенных с учетом функционального зонирования города и испытывающих антропогенную нагрузку разной степени интенсивности: насаждения селитебной зоны (жилой микрорайон «Север») и примагистральные посадки (ул. Удмуртская). В качестве зоны условного контроля (ЗУК) выбран парк ландшафтного типа ЦПКиО им. С.М. Кирова. В каждом насаждении закладывались пробные площади (по 5–10 шт., не менее 0.25 га каждая), на которых проводили инвентаризацию хвойных пород, для физиолого-биохимического исследования отбирали и нумеровали по три учетных растения каждого вида, имеющих хорошее жизненное состояние и среднегенеративное онтогенетическое состояние.

Изучение содержания в хвое растений фотосинтетических пигментов проводилось количественным определением хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в смеси пигментов на спектрофотометре СФ-200 путем определения оптической плотности спиртовой вытяжки пигментов. Хлорофиллы и каротиноиды – в основном липофильные соединения, хорошо растворяются во всех растворяющих липиды веществах: спирте, ацетоне (полярные растворители), бензине, петролейном эфире и др. (неполярные растворители) [6, 7]. В то же время сведения о составе каротиноидов у хвойных растений в научной литературе представлены единично, в методических пособиях приводятся данные о растворимости пигментов, относящихся к группе каротиноидов, приведены их максимумы поглощения и удельные коэффициенты поглощения в основном при использовании этанола в качестве растворителя. Исследования проводились в режиме скрининга, основной целью которых была сравнительная оценка реакции растений на условия среды, где весьма важным является временной фактор. Экстракцию проводили сразу же после сбора материала. Содержание пигментов определяли расчетным путем с помощью формул (I.F. Winternans, A. De Mots):

$$C_a = 13.70 \cdot A_a - 5.76 \cdot A_b;$$

$$C_b = 25.80 \cdot A_b - 7.60 \cdot A_a;$$

$$C_{a+b} = 6.10 \cdot A_a + 20.04 \cdot A_b;$$

$$C_{кар} = 4.695 \cdot A_{кар} - 0.268 (C_{a+b}) \text{ (D. Wettstein) [8].}$$

Анализы проводили в течение вегетационного периода, используя хвою 2012 и 2013 гг., собранную с нижней трети кроны дерева южной экспозиции. Математическую обработку результатов провели с применением статистического пакета «Statistica 6.0». Для интерпретации полученных материалов использовали метод главных компонент и дисперсионный

многофакторный анализ (при последующей оценке различий методом множественного сравнения LSD-test). В процессе сравнения и анализа полученных результатов использовали достоверные различия между признаками (при $P < 0.05$).

Результаты и их обсуждение

На основании фондовых материалов Удмуртского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды для каждого района исследований нами был проведен расчет индекса загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА) по пяти приоритетным загрязнителям (оксид углерода, диоксид азота, формальдегид, бенз(а)пирен, взвешенные вещества) (табл. 1).

Таблица 1

Значения комплексного индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) и суммарного показателя загрязнения почв (СПЗ) в Ижевске

Район исследования	ИЗА	СПЗ
ЦПКиО им. С.М. Кирова	5.2–3.1	8–16
Микрорайон «Север»	5.2–6.5	16–32
ул. Удмуртская	11.9–9.4	32–128

Результаты исследования почв показали, что в зоне условного контроля они отличаются низким уровнем загрязнения (использован суммарный показатель загрязнения почвы (СПЗ), рассчитанный как сумма коэффициентов концентрации, т.е. сумма отношения содержания каждого элемента в исследуемой почве к фоновой концентрации) [9]. В микрорайоне «Север» уровень загрязнения почв оценивается как умеренно опасный, а в магистральных посадках – как опасный (табл. 1).

Для выявления того, какие из показателей содержания фотосинтетических пигментов растений меняются в зависимости от экологической нагрузки, был использован метод главных компонент. В результате были выявлены две главные компоненты во всех категориях насаждений. С помощью анализа сопряженной изменчивости признаков у изучаемых видов древесных растений удалось установить, что в насаждениях парка им. Кирова (зона условного контроля) первая главная компонента отражает параметры содержания в ассимиляционном аппарате растений хлорофилла *a* и каротиноидов. Она высоко значимо отрицательно коррелирует с содержанием хлорофилла *a* (коэффициенты корреляции -0.88...-0.98) и каротиноидов (-0.93...-0.99) у ели колючей и положительно коррелирует с их содержанием у ели европейской (соответственно: 0.99-0.97 и 0.99-0.95). На эту компоненту приходится 77 % изменчивости. Главная компонента 2 охватывает 23 % изменчивости, с ней высоко значимо отрицательно коррелирует содержание хлорофилла *b* в хвое ели европейской (-

0.78-0.96) и положительно коррелирует содержание этого же пигмента в хвое ели колючей (0.33-0.73).

В насаждениях микрорайона «Север» первая главная компонента отражает параметры содержания всех анализируемых пигментов в хвое у ели европейской (2012 г.) и у ели колючей (2013 г.). Она высоко значимо отрицательно коррелирует с этими показателями. На эту компоненту приходится 62 % изменчивости. Главная компонента 2 охватывает 38 % изменчивости, с ней высоко значимо положительно коррелирует содержание пигментов в хвое ели колючей в 2012 г.

В примагистральных насаждениях первая главная компонента (на нее приходится 59 % изменчивости) отражает параметры содержания в хвое растений хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов у обоих изучаемых видов, установленных в 2013 г. и высоко значимо положительно коррелирует с этими показателями. Главная компонента 2 охватывает 41 % изменчивости, с ней высоко значимо отрицательно коррелирует содержание пигментов в хвое ели колючей (2012 г.).

С целью выявления влияния видовых особенностей, условий места произрастания и взаимодействия этих факторов на содержание фотосинтетических пигментов был проведен дисперсионный анализ, который показал, что влияние этих факторов достоверно (при уровне значимости $P < 0.5$) (табл. 2).

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов в хвое ели колючей и ели европейской в насаждениях города (Ижевск, 2012–2013)

Вид	Район исследования	Год/месяц	Фотосинтетические пигменты, мг/г сухого вещества								
			хлорофилл <i>a</i>			хлорофилл <i>b</i>			каротиноиды		
			07	08	10	07	08	10	07	08	10
Ель колючая	ЗУК	2012	0.75	0.66	0.72	0.16	0.21	0.12	0.28	0.23	0.38
	Удмуртская		0.88	0.80	1.02'	0.16	0.22	0.18	0.32	0.34	0.51*
	мкр.Север		1.01	1.33'*	0.52*	0.32	0.29	0.12	0.34	0.37	0.28
	ЗУК	2013	0.62	0.53	0.62	0.12	0.18	0.11	0.22	0.19	0.33
	Удмуртская		0.72	0.79	0.93'	0.12	0.21	0.14	0.26	0.31	0.46*
	мкр.Север		0.93'	1.26'*	0.45*	0.31	0.36	0.08	0.29	0.49'*	0.24
Ель европейская	ЗУК	2012	0.76	0.52*	1.15*	0.14	0.53*	0.19	0.29	0.38	0.61*
	Удмуртская		0.81	0.71	0.78'	0.15	0.45*	0.10	0.32	0.26	0.45
	мкр.Север		0.78	0.44*	0.85'	0.47'	0.21'	0.35	0.22	0.16'	0.58*
	ЗУК	2013	0.81	0.71	1.11	0.19	0.41	0.17	0.29	0.29	0.59*

	Удмуртская		0.64	0.79	0.71'	0.14	0.23	0.07	0.24	0.32	0.41'*
	мкр.Север		0.58	0.42	0.81	0.20	0.28	0.74'*	0.20	0.13	0.48*
НСР ₀₅	2012		0.15			0.32			0.15		
			0.30			0.50			0.14		

Примечания: ' – достоверные различия в насаждениях по сравнению с зоной условного контроля ($P < 0.05$); * – достоверные различия в августе, октябре по сравнению с июлем ($P < 0.05$).

При изучении динамики хлорофилла *a* в хвое ели колючей установлено, что в течение вегетации его содержание достоверно изменялось только в насаждениях микрорайона Север, при этом в августе содержание увеличивалось по сравнению с июлем и затем резко снижалось в октябре. Эта закономерность выявлена во все годы наблюдений [10].

Содержание хлорофилла *a* в хвое ели колючей в изучаемых типах насаждений достоверно изменялось по сравнению с контролем в насаждениях мкр. Север в августе (на 0.67 и 0.73 мг/г сух. в-ва больше соответственно в 2012 и 2013 гг. по сравнению с показателями в ЗУК) и в примагистральных посадках в октябре (на 0.30 и 0.31 мг/г сух. в-ва выше, чем в ЗУК, при $НСР_{05} = 0.09$).

Динамика содержания хлорофилла *a* в хвое ели европейской показала, что его содержание в течение вегетации достоверно менялось лишь в насаждениях парковой зоны (ЗУК) в 2012 г. В августе показатель снижался до 0.52 мг/г сух. в-ва (июль 0.76 мг/г сух. в-ва), а в октябре увеличивался до 1.15 мг/г сух. в-ва. При сравнении показателей в разных типах насаждений с контролем выявлено, что в отличие от ели колючей у этого вида наблюдалось достоверное снижение хлорофилла *a* в хвое растений в примагистральных посадках в конце вегетационного периода (октябрь) в оба года наблюдения (на 0.37-0.4 мг/г сух. в-ва).

Таким образом, можно отметить, что вегетационная динамика содержания хлорофилла *a* у изучаемых видов елей в насаждениях города различна. Однако во всех насаждениях в оба года исследований содержание хлорофилла *a* в хвое ели европейской существенно ниже, чем у ели колючей, исходя из этого можно предположить, что одной из причин устойчивости ели колючей в городских условиях является стабильность хлорофилла *a* и его высокое содержание.

При изучении динамики хлорофилла *b* у ели колючей установлено, что в течение двухлетних наблюдений и в разных типах насаждений достоверных различий нет. Этот факт также свидетельствует о стабильности в содержании хлорофиллов у ели колючей.

У ели европейской содержание хлорофилла *b* в течение вегетации достоверно менялось в насаждениях ЗУК и в примагистральных посадках, наибольшие показатели

отмечены в середине и в конце вегетационного периода (август, октябрь). При сравнении содержания хлорофилла *b* у растений в разных типах насаждений выявлено его достоверное снижение в конце вегетационного периода у растений, произрастающих в насаждениях мкр. Север по сравнению с ЗУК.

Динамика содержания каротиноидов в хвое ели колючей выявила достоверное увеличение каротиноидов в октябре, то есть в конце активной вегетации, по сравнению с июлем в магистральных посадках, а у ели европейской во всех типах насаждений, что, безусловно, свидетельствует о защитной антиоксидантной роли пигмента. При этом у ели европейской содержание каротиноидов было существенно ниже в насаждениях микрорайона Север (август, 2012 г.) и в магистральных посадках (октябрь, 2013 г.) по сравнению с ЗУК. Следует отметить, что аналогичные выводы были установлены при изучении структурно-функциональных изменений фотосинтетического аппарата ряда интродуцированных хвойных растений (на примере представителей семейств *Taxaceae* и *Cupressaceae*), произрастающих в парке Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН [7].

Выводы

Сравнивая изучаемые виды, можно наблюдать их различную реакцию на возрастание техногенной нагрузки и, соответственно, судить об их различной устойчивости: ель колючая, в силу наличия более мощной кутикулы и воскового налета, более устойчива к загрязнению атмосферного воздуха, и реакция фотосинтетического аппарата проявляется лишь в условиях наиболее высокой загазованности (в магистральных посадках).

У ели колючей в насаждениях города наблюдалась относительная стабильность содержания хлорофиллов *a* и *b*, а также более высокие концентрации хлорофилла *a* по сравнению с показателями ели европейской.

Содержание каротиноидов в хвое ели колючей увеличивается почти в 2 раза в насаждениях мкр. Север (август, 2012 г.). Тогда как у ели европейской оно, наоборот, снижается на 0.22 мг/г сух. в-ва в насаждениях мкр. Север (при $НСР_{0.5}=0.05$), а также и в магистральных посадках (октябрь, 2013 г.) – на 0.18 мг/г сух. в-ва (при $НСР_{0.5}=0.04$).

В целом следует отметить, что содержание фотосинтетических пигментов у обоих изучаемых видов в 2012 г. было значительно выше по сравнению с 2013 г., что обусловлено различиями метеорологических условий в годы наблюдения.

Полученные результаты свидетельствуют о более выраженных адаптивных возможностях фотосинтетического аппарата ели колючей, что служит основанием рекомендовать этот вид для более широкого использования в насаждениях города.

Список литературы

1. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск: ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет», 2012. 206 с.
2. Бухарина И.Л., Поварничина Т.М. Эколого-биологическая характеристика *Picea pungens* (Pinaceae) в условиях городской среды // Растительные ресурсы. 2013. Т. 49, вып. 3. С. 312-318.
3. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. Древесные растения и урбанизированная среда. Новосибирск: Наука, 2003. 22 с.
4. Веретенников А.В. Фотосинтез древесных растений. Воронеж: ВГУ, 1980. 76 с.
5. Чернышенко О.В. Древесные растения в экстремальных условиях города // Экология, мониторинг и рациональное природопользование: науч. тр. 2001. Вып. (307)1. С. 140-146.
6. Булда О.В., Рассадина В.В., Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. Спектрофотометрический метод определения содержания каротиноидов, ксантофиллов и хлорофиллов в экстрактах семян растений // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 4. С. 604-611.
7. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С. и др. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата у зимневегетирующих хвойных растений в различные сезоны года // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 5. С. 672-681.
8. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Большой практикум по фотосинтезу / под ред. И.П. Ермакова. М.: АCADEMIA, 2003. С. 42-58.
9. Ревич Б.А., Саев Ю.Е. Эколого-геохимическая оценка окружающей среды промышленных городов // Урбоэкология. М.: Наука, 1990. 124 с.
10. K. Vedernikov, I. Bukharina, A. Alekseenko. Environmental assessment and the use of plants of the genus *Picea* forests of the city of Izhevsk // Australian Journal of Scientific Research, 2014, No.1. (5) (January-June). Volume III. "Adelaide University Press". Adelaide, 2014. P. 243-248.

Рецензенты:

Туганаев В.В., д.б.н., профессор, профессор кафедры общей экологии и природопользования ФГБОУ ВПО «УдГУ», г. Ижевск;

Фатыхов И.Ш., д.с.-х.н., профессор, зав. кафедрой растениеводства ФГБОУ ВПО «ИжГСХА», г. Ижевск.