

УДК 581.5; 581.8

UDC 581.5; 581.8

**БИОИНДИКАЦИОННЫЕ
ВОЗМОЖНОСТИ ХВОЙНЫХ
РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
УРБАНОФИТОЦЕНОЗОВ г. МИНСКА****BIOINDICATION POSSIBILITIES OF
CONIFEROUS PLANTS IN THE
CONDITIONS OF MINSK'S
URBANOPHYTOCENOSSES****Е. В. Жудрик,***кандидат биологических наук, доцент
кафедры биологии и методики
преподавания биологии Белорусского
государственного педагогического
университета имени Максима Танка;***О. О. Губарь,***учитель биологии и химии ГУО «Свислочская
средняя школа Осиповичского района»;***А. В. Деревинский,***кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры биологии и методики
преподавания биологии Белорусского
государственного педагогического
университета имени Максима Танка***E. Zhudrik,***PhD in Biology, Associate Professor
of the Department of Biology and Methods
of Teaching Biology, Belarusian State
Pedagogical University named
after Maxim Tank;***O. Gubar,***teacher of biology and chemistry at SEI «Svisloch
secondary school of Osipovich district»;***A. Derevinskij,***PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor
of the Department of Biology and Methods
of Teaching Biology, Belarusian State
Pedagogical University named
after Maxim Tank*

Поступила в редакцию 17.01.2024.

Received on 17.01.2024.

В статье приведены результаты комплексной оценки влияния факторов антропогенной среды на анатомическую структуру хвойных растений и выявления специфики их адаптаций. Проведен сравнительный анализ особенностей адаптации аборигенных хвойных растений разных родов и видов в условиях антропогенного воздействия и определены наиболее информативные анатомические показатели для оценки состояния хвойных древесных растений в условиях города. Выявлены индикаторные виды и их наиболее чувствительные параметры для оценки загрязнения городской среды.

Ключевые слова: хвойные растения, биоиндикация, урбанофитоценозы.

The article presents the results of a comprehensive assessment of the influence of anthropogenic environmental factors on the anatomical and morphological structure of coniferous plants and the identification of specificities of their adaptations. A comparative analysis of the peculiarities of aboriginal coniferous plants' adaptation of different genera and species under conditions of anthropogenic impact has been carried out and the most informative anatomical indicators for assessing the condition of coniferous woody plants in urban conditions have been determined. The most sensitive indicator species and their most sensitive parameters for assessing urban pollution have been identified.

Keywords: coniferous plants, bioindication, urbanophytocenoses.

Введение. Урбанизированные территории отличаются широким диапазоном разнообразия действия климатических, эдафических, орографических факторов, а также характера загрязнений. Определение степени загрязнения окружающей среды в конкретном участке города в таких случаях представляет определенные сложности. Методы биохимического, физического анализа, как правило, трудоемки и требуют больших материальных затрат [1; 3]. В этой связи все большую актуальность приобретают биологические методы индикации, которые позволяют оценить комплексное воздействие загрязняющих веществ. Среди биологических объектов древесные хвойные растения представляют собой наиболее информативные для характеристики лонгитюдных изменений, так как наряду с высокой чувствитель-

ностью к экологическим изменениям среды они предоставляют возможность проведения фитоиндикационных исследований в любое время года за счет сохранения листвы [2; 8].

Структурно-функциональные адаптации хвойных растений в условиях повышенной антропогенной нагрузки представляют особый интерес, так как их приспособленность формируется на фоне комплексного влияния экологических факторов, техногенных воздействий и рекреационных нагрузок [3; 4]. Изменения в анатомической структуре листьев служат важным индикатором формирования специфических адаптаций к условиям городской среды [5], но вместе с тем малоизучены. Исследование состояния анатомической структуры листьев хвойных разных родов и видов в условиях антропогенного прессинга позволит понять

потенциальный уровень их устойчивости [6]. Целью данного исследования в этой связи стала комплексная оценка влияния факторов урбанизированной среды на анатомо-морфологическую структуру аборигенных хвойных растений для оценки перспективы их использования в качестве биоиндикационных объектов, а также в структуре озеленения города на основе специфики их адаптаций.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были привлечены хвойные растения аборигенной для Беларуси флоры, произрастающие в зеленых насаждениях территорий с высокой антропогенной нагрузкой г. Минска, а также контрольные образцы, произрастающие в естественных условиях смешанного леса в д. Зеленое. Изучены два аборигенных вида хвойных растений, чаще всего встречающиеся в структуре озеленения г. Минска: *Picea abies* (ель обыкновенная) и *Pinus sylvestris* (сосна обыкновенная).

Предметом исследования послужила анатомическая структура листьев и их приспособления в условиях антропогенного влияния на урбанизированных территориях.

Хвою исследуемых видов собирали в средней части кроны с учетом возрастных изменений – в нижней, средней и верхней части побегов (молодая, средневозрастная и старая хвоя) в количе-

стве 15 хвоинок с каждой части побегов в трехкратной повторности с 10 деревьев. Всего исследовано 350 хвоинок каждого возраста у обоих видов хвойных растений. Для изучения анатомической структуры проводили серию поперечных срезов хвои с последующим микроскопическим исследованием на основе использования цифрового оптического микроскопа Axioskop 2 PLUS Carl Zeiss и линейки окулярного микрометра. Анатомическая структура анализировалась по следующим признакам: устьичный индекс, морфометрические параметры покровных тканей, хлоренхимы, аэренхимы, склеренхимной обкладки пучка, число и диаметр смоляных ходов и проводящих пучков, количество хлоропластов ассимиляционной ткани. Для анализа полученных результатов использовались методы исследования биометрических показателей анатомической структуры растений, а также метод определения суммарного устьичного индекса [7]. Статистическую значимость различий по величинам интегральных показателей определяли по t-критерию Стьюдента.

Результаты и их обсуждение. Анатомические исследования структуры хвои *Picea abies* и *Pinus sylvestris* разных возрастов, произрастающей в естественных и городских условиях, показали следующие результаты (таблицы 1–2).

Таблица 1 – Морфометрические показатели анатомической структуры хвои *Picea abies*

Возраст хвои	молодая		средневозрастная		старая	
	естественные	городские	естественные	городские	естественные	городские
Условия роста						
Элемент структуры						
кутикула, мкм	10,0±1,8	11,3±1,2	11,0±1,4	10,5±1,1	10,0±0,01*	12,5±0,01
гиподерма, мкм	17,0±2,8	18,0±2,1	11,0±1,4	10,5±1,1	20,0±1,8	16,5±1,4
эпидермис, мкм	2,5±0,03	2,5±0,01	2,5±0,04	2,5±0,09	2,4±0,018	2,5±0,01
устьичный индекс, %	12,2±0,06*	9,1±0,05	20,2±0,05*	11,1±0,03	9,1±0,08	8,2±0,05
мезофилл, мкм	1280,0±5,7*	1191,1±1,1	1020,1±6,7*	1080,0±10,9	1105,0±5,7*	1150,0±5,0
слои	3,1±0,6	4,1±0,5	4,0±0,4	5,0±0,4	4,1±0,4	4,0±0,4
количество хлоропластов, шт.	75,0±5,1	70,0±1,8	78,1±1,6	70,1±2,1	87,0±7,5	70,2±5,1
диаметр смоляного хода, мкм	отсутствует	97,5±1,5	отсутствует	85,0±5,6	отсутствует	102,5±1,5
диаметр жилки, мкм	86,0±8,4	90,3±10,1	84,5±3,3	91,0±11,8	96,1±2,0	97,5±10,1
склеренхимная обкладка пучка, мкм	74,0±4,5	90,0±10,4	66,5±11,1	89,0±4,9	71,5±6,5	92,5±1,1
слои	3,1±0,5	4,0±0,4	4,0±0,4	4,1±0,3	4,0±0,2	5,0±0,5

Примечание – *статистически достоверные различия при уровне значимости $p < 0,05$.

Отсутствием статистически достоверных отличий характеризуются показатели размерности и количества слоев покровных тканей хвои ели обыкновенной в городских и естественных условиях произрастания: эпидермальный, кутикулярный и субэпидермальный слои листа, с незначительным увеличением размеров гиподермы с 17,0 до 20,0 мкм в естественных условиях и уменьшением с 18,0 мкм до 16,5 мкм в городских условиях. В то же время наблюдается тенденция к увеличению абсолютных размеров кутикулярного слоя у старых листьев в условиях города, что, вероятно, связано с формированием адаптаций к уменьшению испарения и защите от газов и пыли. В естественных условиях суммарный устьичный индекс составляет 12,2–20,2 %, что характерно для хвойных растений умеренного пояса; при этом в городской среде наблюдается снижение данного показателя в 1,5–2 раза, максимальное у средневозрастных листьев, что свидетельствует о процессах ксероморфизации [4; 5].

Мезофилл хвои данного вида отличается независимо от условий произрастания постоянством показателей количества слоев и содержания в клетках хлоропластов. Абсолютные значения размера ассимиляционной ткани изменяются с возрастом в сторону незначительного уменьше-

ния: у молодой хвои размер хлоренхимы составлял 1280,0 мкм, у средневозрастной – 1020,0, у старой – 1105,0 мкм. Отмечено увеличение количества слоев хлоренхимы, что наряду со снижением ее абсолютных размеров свидетельствует об измельчении структуры мезофилла.

Вместе с тем в городских условиях отмечена тенденция к формированию мелкоклеточности мезофилла без увеличения, в отличие от естественной среды, количества хлоропластов в клетках, что определенно сказывается на продуктивности растений.

В проводящем пучке такие параметры, как диаметр, размерные показатели склеренхимной обкладки менялись незначительно как с возрастом, так и в зависимости от условий среды. Вместе с тем отмечено некоторое увеличение диаметра проводящего пучка в молодой хвое в городских условиях с одновременным увеличением слоев склеренхимной обкладки без изменения размерных показателей, что свидетельствует о компенсации воздушного питания минеральным.

Анализ параметров кутикулярного и эпидермального слоя сосны обыкновенной в городских условиях показал соизмеримые с естественными условиями значения независимо от возраста хвои (таблица 2).

Таблица 2 – Морфометрические показатели анатомической структуры хвои *Pinus sylvestris*

Возраст хвои	молодая		средневозрастная		старая	
	естественные	городские	естественные	городские	естественные	городские
Условия роста						
Элемент структуры						
кутикула, мкм	12,0±1,1	12,1±1,0	12,0±1,1	15,0±2,7	12,5±0,3	13,0±1,1
гиподерма, мкм	14,1±1,2	13,5±1,4	18,5±1,2	12,5±0,5	16,3±3,0	12,5±0,7
эпидермис, мкм	3,8±0,1	3,8±0,1	3,8±0,1	3,8±0,2	3,7±0,3	3,8±0,1
устьичный индекс, %	14,5±0,06	14,2±0,05	18,2±0,05*	15,1±0,03	10,1±0,08*	6,2±0,05
мезофилл, мкм	345,0±3,6	355,0±4,8	345,0±5,9*	290,1±2,8	350,1±9,1	320,0±2,9
слои	3,0±0,5	3,0±0,4	3,1±0,5	3,0±0,5	3,1±0,2	3,0±0,3
количество хлоропластов, шт.	91,0±4,1	82,2±4,2	92,0±4,4	82,0±2,6	95,1±5,6	82,1±5,4
диаметр смоляного хода, мкм	105,0±1,2	102,5±5,6	101,1±2,2	95,2±0,8	102,5±5,1	100,1±0,5
диаметр жилки, мкм	100,2±8,0	117,5±6,4	112,5±5,3	120,0±4,3	102,5±5,5	120,1±5,6
склеренхимная обкладка пучка, мкм	132,5±8,1	137,5±2,7	157,5±16,7	125,1±2,8	172,5±6,3*	136,7±2,7
слои	6,1±0,4	6,0±0,5	6,1±0,5	6,0±0,4	6,0±0,5	6,1±0,5

Примечание – *статистически достоверные различия при уровне значимости $p < 0,05$.

В целом параметры развития покровных тканей у хвои сосны отличаются константностью независимо от условий существования. Однако у молодой хвои кутикулярный слой составлял 12,5 мкм, у старой – 13,0 мкм, в то время как у средневозрастной хвои его размеры увеличились до 15,0 мкм. При этом отмечено уменьшение размеров гиподермы по сравнению с естественными местообитаниями при неизменности показателя в возрастном ряду (13,5–12,5 мкм). Эпидерма не меняла своих значений и составила 3,8 мкм [3].

Суммарный устьичный индекс достигает максимума у хвои среднего возраста, а затем снижается в 1,5–2 раза у старых хвоинок [4]. В среднем, в естественных условиях он составляет – 14,5–18,2 %, а в городских – 14,2–15,1 %. При этом с переходом в условия повышенного загрязнения прослеживается снижение данного показателя, как и в случае ели обыкновенной, в 1–1,5 раза у средневозрастных и старых листьев, что свидетельствует о процессах ксероморфизации.

Ассимиляционная ткань хвои сосны мало изменяется в возрастном ряду в естественной среде и ее размерные показатели колеблются от 345,0 мкм до 350,0 мкм. Количество слоев хлоренхимы, а также содержание хлоропластов в клетках константно и составило в среднем 3 и 82,0 соответственно. Абсолютные значения размера ассимиляционной ткани в условиях антропогенной нагрузки также соизмеримы со значениями данного параметра хвои в естественных фитоценозах и мало менялись с возрастом. Относительно постоянными размерными значениями характеризовались и смоляные ходы, и проводящие пучки. При этом развитие проводящего пучка сопровождалось в естественных условиях увеличением абсолютных размеров склеренхимной обкладки: от 132,5 мкм у молодой хвои до 172,5 у старой хвои, а в городской среде – уменьшением с возрастом количества склеренхимы вокруг пучков.

В городской среде при увеличении антропогенной нагрузки в анатомической структуре хвои сосны можно констатировать формирование адаптаций через константность ее показателей.

Заключение. Проведенные исследования показали, что анатомическая структура хвои голосеменных растений имеет видовую, возрастную специфичность, а также разную чувствительность к воздействию факторов окружающей среды. Видоспецифичность структуры проявляется в отличиях организации мезофилла, покровных тканей, степени развития кутикулярных слоев и склеренхимных обкладок, а также размерности смоляных ходов и проводящих пучков.

У растений *Picea abies* с переходом в условия увеличения антропогенной нагрузки в анатомиче-

ской структуре хвои можно констатировать формирование адаптаций по пути склерификации (увеличение склеренхимной обкладки пучка, развитие мелкоклеточности мезофилла и механической ткани) и ксероморфизации посредством незначительного увеличения защитных кутикулярных слоев в покровной ткани и уменьшения суммарного устьичного индекса. При этом наблюдаются негативные последствия влияния городской среды, проявляющиеся в сокращении количества хлоропластов в клетках мезофилла и, как компенсация воздушного питания, увеличение диаметра проводящих пучков.

Анатомическая структура хвои *Pinus sylvestris* отличается в возрастном ряду и независимо от условий среды константными показателями большинства структурных элементов: размеров и количества слоев покровной ткани и ее производных, мезофилла листа, а также его содержания, тканей проводящего пучка и его обкладки. Однако чувствительным показателем, как и у *Picea abies*, остается устьичный индекс, характеризующийся уменьшением в возрастном ряду, особенно выраженным в условиях техногенной нагрузки. Также следует отметить противоположную растению ели тенденцию к истончению с возрастом склеренхимных обкладок проводящих пучков хвои сосны в городской среде.

Вместе с тем изученные аборигенные виды ели и сосны в целом характеризуются сходными адаптациями, основанными на малой подверженности анатомической структуры воздействию факторов среды, и как следствие, ее константности. Общими приспособительными реакциями в условиях действия антропогенного влияния следует отметить истончение кутикулярного и гиподермального слоя, уменьшение размерных параметров и измельчение слоев хлоренхимы, а также уменьшение диаметра проводящих пучков. Выявлены достоверные изменения устьичного аппарата по пути увеличения ксероморфности структуры.

Наиболее информативными показателями для оценки влияния антропогенных условий на состояние листьев аборигенных хвойных древесных растений следует признать динамичные в ряду опытов: устьичный индекс, степень развития кутикулы, гиподермы и склеренхимных обкладок, размерные параметры ассимиляционных тканей. При этом растения *Picea abies* являются, по сравнению с *Pinus sylvestris*, более чувствительными по совокупности показателей к усилению антропогенного прессинга и с большей эффективностью могут быть привлечены в качестве биоиндикационных объектов для достоверного определения состояния среды в урбанофитоценозах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, В. А. Влияние загрязнения на изменение морфоструктуры деревьев / В. А. Алексеев // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В. А. Алексеева. – Л., 1990. – Гл. 7. – С. 87–94.
2. Гарицкая, М. Ю. Экологические особенности городской среды : учеб. пособие / М. Ю. Гарицкая, А. И. Байтелова, О. В. Чекмарева. – Оренбург : Оренбург. гос. ун-т, 2012. – 216 с.
3. Губарь, О. О. Особенности структурно-анатомических адаптаций хвои *Pinus sylvestris* и *Pinus sibirica* к условиям городской среды (на примере г. Минска) / О. О. Губарь // Современные проблемы естествознания в науке и образовательном процессе : сб. ст. Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Минск, 19 нояб. 2019 г. / Белорус. гос. пед. ун-т ; редкол.: А. В. Деревинский [и др.]. – Минск, 2019. – С. 44–45.
4. Губарь, О. О. Оценка состояния устьичного аппарата листьев хвойных растений в условиях антропогенного прессинга / О. О. Губарь, Е. В. Жудрик // Образование. Наука. Культура : сб. науч. ст. междунар. науч. форума, Гжель, 20 нояб. 2019 г. / Гжел. гос. ун-т ; отв. ред. Н. В. Осипова. – Гжель, 2020. – С. 264–266.
5. Губарь, О. О. Структурно-анатомические адаптации хвойных растений к условиям повышенной антропогенной нагрузки (на примере *Picea abies*) / О. О. Губарь // Молодежь в науке и творчестве : материалы междунар. науч. форума обучающихся, Гжель, 25 апр. 2018 г. : сб. науч. ст. / Гжел. гос. ун-т ; редкол.: Б. В. Илькевич [и др.]. – Гжель, 2018. – С. 725–727.
6. Коновалов, В. Н. Состояние ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в условиях аэрального загрязнения / В. Н. Коновалов, С. Н. Тарханов, Е. Г. Костина // Лесоведение. – 2001. – № 6. – С. 43–46.
7. Методы экологических исследований : учеб.-метод. пособие / И. С. Макеев [и др.] ; под ред. Е. А. Ерофеевой. – Нижний Новгород : Нижегородск. гос. ун-т, 2018 – 101 с.
8. Фролов, А. К. Растения и экология города / А. К. Фролов // Промышленная ботаника: состояние и перспективы развития : тез. докл. респ. науч. конф., посвящ. 25-летию Донец. ботан. сада АН УССР, Донецк, сент. 1990 г. / Акад. наук УССР, Донец. ботан. сад ; редкол.: В. П. Тарабрин (отв. ред.) [и др.]. – Киев, 1990. – С. 151–153.

REFERENCES

1. Alekseev, V. A. Vliyanie zagryazneniya na izmenenie morfostruktury derev'ev / V. A. Alekseev // Lesnye ekosistemy i atmosfernoie zagryaznenie / pod red. V. A. Alekseeva. – L., 1990. – Gl. 7. – S. 87–94.
2. Garickaya, M. Yu. Ekologicheskie osobennosti gorodskoj sredy : ucheb. posobie / M. Yu. Garickaya, A. I. Bajtelova, O. V. Chekmareva. – Orenburg : Orenburg. gos. un-t, 2012. – 216 s.
3. Gubar', O. O. Osobennosti strukturno-anatomicheskikh adaptacij hvoi *Pinus sylvestris* i *Pinus sibirica* k usloviyam gorodskoj sredy (na primere g. Minska) / O. O. Gubar' // Sovremennye problemy estestvoznaniya v nauke i obrazovatel'nom processe : sb. st. Resp. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, Minsk, 19 noyab. 2019 g. / Belarus. gos. ped. un-t ; redkol.: A. V. Derevinskij [i dr.]. – Minsk, 2019. – S. 44–45.
4. Gubar', O. O. Ocenka sostoyaniya ust'ichnogo apparata list'ev hvoynyh rastenij v usloviyah antropogennoego pressinga / O. O. Gubar', E. V. Zhudrik // Obrazovanie. Nauka. Kul'tura : sb. nauch. st. mezhdunar. nauch. foruma, Gzhel', 20 noyab. 2019 g. / Gzhel. gos. un-t ; otv. red. N. V. Osipova. – Gzhel', 2020. – S. 264–266.
5. Gubar', O. O. Strukturno-anatomicheskie adaptacii hvoynyh rastenij k usloviyam povyshennoj antropogennoj nagruzki (na primere *Picea abies*) / O. O. Gubar' // Molodezh' v nauke i tvorchestve : materialy mezhdunar. nauch. foruma obuchayushchihся, Gzhel', 25 apr. 2018 g. : sb. nauch. st. / Gzhel. gos. un-t ; redkol.: B. V. Il'kevich [i dr.]. – Gzhel', 2018. – S. 725–727.
6. Konovalov, V. N. Sostoyanie assimilyacionnogo apparata sosny obyknovennoj v usloviyah aeral'nogo zagryazneniya / V. N. Konovalov, S. N. Tarhanov, E. G. Kostina // Lesovedenie. – 2001. – № 6. – S. 43–46.
7. Metody ekologicheskikh issledovanij : ucheb.-metod. posobie / I. S. Makeev [i dr.] ; pod red. E. A. Erofeevoy. – Nizhnij Novgorod : Nizhegorodsk. gos. un-t, 2018 – 101 s.
8. Frolov, A. K. Rasteniya i ekologiya goroda / A. K. Frolov // Promyshlennaya botanika: sostoyanie i perspektivy razvitiya : tez. dokl. resp. nauch. konf., posvyashch. 25-letiyu Donec. botan. sada AN USSR, Doneck, sent. 1990 g. / Akad. nauk USSR, Donec. botan. sad ; redkol.: V. P. Tarabrin (otv. red.) [i dr.]. – Kiev, 1990. – S. 151–153.