

УДК 502.171(470.45)

DOI 10.25688/2076-9091.2019.36.4.2

**И.В. Савенкова,
С.В. Пашков**

Биоэкологический мониторинг деревьев в условиях городской среды

В статье изучены анатомическое строение и структура эпидермального комплекса листовой пластинки лиственных древесных пород г. Петропавловска. Выявлены особенности строения эпидермы листьев деревьев и кустарников, являющихся основой зеленого строительства. Виды отличаются типом листа, морфологией основных эпидермальных клеток. Выявленные особенности строения эпидермы могут использоваться в качестве дополнительных диагностических признаков при мониторинговых анатомо-морфологических исследованиях по живым образцам.

Ключевые слова: дополнительные диагностические признаки; индикаторы; методы биоиндикации; отпечаток (слепок) эпидермиса листьев; эпидермальный комплекс.

Введение

Мониторинг состояния древесных растений урбозкосистем — это относительно новое направление, имеющее большое прикладное значение. Алгоритм мониторинга был предложен рабочей группой при Европейской экономической комиссии ООН в 1985 г. [1]. Необходимость такого масштабного мероприятия в первую очередь связана с увеличением антропогенных воздействий на древесные растения, наиболее агрессивным из которых является загрязнение воздуха.

Основной целью системы мониторинга является сбор репрезентативных и сопоставимых данных об изменениях, происходящих в городских растениях под воздействием загрязнения атмосферы и других неблагоприятных факторов. Оценочные исследования состояния городских экосистем позволяют разрабатывать меры по повышению устойчивости и их рациональному использованию.

Исследования по выявлению характера приспособительных реакций древесных пород городских насаждений в условиях техногенного загрязнения территории г. Петропавловска посредством определения параметров

биоиндикативных сигнальных признаков в условиях Северо-Казахстанской области (СКО) проведены впервые за продолжительное время.

Результаты исследований позволят выработать рекомендации по обследованию городских древесных насаждений (их созданию и реконструкции).

Целью исследований являлось изучение реакции основных сигнальных признаков зеленых насаждений в свете всевозрастающего техногенного загрязнения территории г. Петропавловска.

Материал и методы исследований

Объектами исследования послужили 19 видов (листьевая/хвойная часть), как аборигенных, так и интродуцированных древесных растений, являющихся элементами зеленой зоны города: барбарис обыкновенный (*Berberis vulgaris* L., 1753), береза бородавчатая (*Betula verrucosa* Roth), береза пушистая (*B. pubescens* Ehrh., 1789), боярышник обыкновенный (*Crataegus laevigata* (Poir) DC. 1825)), вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.), вяз мелколистный (*U. parvifolia* Jacq.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L. 1753), ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H. Karst., 1881)), ива белая (*Salix alba* L. 1753), карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam. 1785), клен ясенелистный (*Acer negundo* L. 1753), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb. 1783), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L. 1753), сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L. 1753), сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L. 1753), тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L. 1753), тополь белый (*P. alba* L. 1753), тополь пирамидальный (*P. nigra* f. *pyramidalis* Rozier), шиповник собачий (*Rosa canina* L. 1753), яблоня сибирская (*Malus baccata* L. (Воркн) 1803)).

Сбор материала и получение практического подтверждения актуальности мониторинга состояния зеленой зоны г. Петропавловска осуществлялись по методикам ICP-Forest [2] с использованием метода Пирсона-Фишера [3]; оценка состояния деревьев и степени нарушенности дендроморфы проводили визуально по шкалам, характеризующим степень загрязненности атмосферного воздуха [4]; изучение эпидермального комплекса листьев проводили методом слепков (отпечатков), по Н.А. Анели [5] (см. рис. 1); типы устьичных аппаратов определяли по классификации М.А. Барановой [6]; устьичный индекс рассчитывали по формуле А. Kastner [7]; описание эпидермального аппарата проводили по С.Ф. Захаревич [8] и М.Н. Прозиной [9].



Рис. 1. Микроскопическое изучение эпидермы листовых пластинок методом Анели

Обсуждение результатов исследований

Обследование зеленых насаждений в пределах городской черты показало, что большая часть изучаемых объектов (древесные растения) не показала признаков ослабленности, явных повреждений или изменений не отмечалось. Среди фракции хвойных деревьев сухостоя не обнаружено (коммунальные службы города оперативно удаляют такие деревья), однако среди лиственных встречались деревья — свежий сухостой (тополь пирамидальный, клен, яблоня). Эти объекты имели желтые листья с некротическими пятнами, многие ветви не имели листья вообще (табл. 1).

Среди лиственных насаждений барбариса, березы, ив и тополей встречались усыхающие деревья. Среди признаков нарушенности можно отметить в различной степени поврежденные кроны, на отдельных ветвях установлено усыхание листы до 75 %. Листья большинства деревьев в нижней части кроны имели признаки хлоротичности, цветовая гамма некротических участков имела вариации от коричневого до черного (см. рис. 2).

Таблица 1

Общее состояние модельных деревьев

Порода	Баллы						Индивидуальная выносливость, %
	5	4	3	2	1	0	
	количество из 24 шт.						
Ель обыкновенная	20	3	1	–	–	–	83,3
Лиственница сибирская	17	4	2	1	–	–	70,8
Сосна обыкновенная	17	6	1	–	–	–	70,8
Адаптивная жизнеспособность 28,3 %							
Барбарис обыкновенный	16	4	2	2	–	–	66,7
Береза повислая	17	2	3	2	–	–	70,8
Береза пушистая	15	3	4	2	–	–	62,4
Боярышник обыкновенный	20	3	1	–	–	–	83,3
Вяз гладкий	17	4	3	–	–	–	70,8
Вяз мелколистный	18	3	3	–	–	–	75,0
Дуб черешчатый	21	2	1	–	–	–	87,5
Ива серебристая	15	5	3	1	–	–	62,5
Карагана древовидная	22	2	–	–	–	–	91,6
Клен ясенелистный	18	3	2	–	1	–	75,0
Рябина обыкновенная	22	2	–	–	–	–	91,6
Сирень обыкновенная	20	3	1	–	–	–	83,3
Тополь бальзамический	13	5	4	2	–	–	54,2
Тополь белый	16	4	2	2	–	–	66,7
Тополь пирамидальный	10	3	5	3	3	–	41,7
Шиповник собачий	20	3	1	–	–	–	83,3
Яблоня сибирская	13	5	4	–	2	–	54,2
Адаптивная жизнеспособность 21,4 %							



Рис. 2. Повреждение листьев тополя бальзамического (июль, 2019 г.; район ТЭЦ – 2)

Среди всех обследованных объектов выявлены сильно ослабленные деревья, причем среди хвойных частота встречаемости таких деревьев на 8,6 % меньше, чем среди лиственных. У этих деревьев повсеместно фиксировалась ажурность кроны, ее разреженность, повреждение и усыхание достигало до 70 % листовая (хвойной) части, наблюдалась начинающаяся суховершинность, усыхание скелетных ветвей в средней и верхней частях кроны. Наиболее подверженными ослаблению оказались тополя.

Значительную долю от общего числа обследованных объектов составляли особи со слабоажурной кроной, отмечалось усыхание отдельных ветвей в нижней трети кроны. Порядка 15 % листьев имели обширные хлоротичные и некротические участки. Такие нарушения обнаружены у 18,1 % хвойных и 15,0 % лиственных растений.

И все же основная доля деревьев (66,2 %) не имела явных признаков ослабленности и отмечена в полевом журнале как категория внешне здоровых объектов: хвойные — 75,0 % и лиственных — 60,8 %.

Адаптивная жизнеспособность деревьев урбоэкосистем невысока — 28,3 % у хвойных и 21,4 % у лиственных пород. Индивидуальная выносливость среди обследованных объектов сильно варьирует — лучше переносят условия техногенного загрязнения боярышник, сирень, шиповник (индивидуальная выносливость составляет 83,3 %), дуб (87,5 %), карагана,

рябина (91,6 %). Наименее приспособленными к условиям города оказались тополя пирамидальный и бальзамический (41,7–54,2 % соответственно) и яблоня (54,2 %). Это обусловлено экологическими характеристиками как самих объектов, так и условий произрастания.

Степень дефолиации

Изменения биоморфологических показателей ассимиляционного аппарата влечет за собой изменения формы кроны, ее сомкнутость, дефолиацию и ежегодный опад. При оценке процесса дефолиации необходимо обращать особое внимание на форму кроны (с учетом «окон») [10].

Дефолиация отмечается у всех изучаемых объектов, причем лиственные породы по показателям сомкнутости кроны и проценту дефолиации превосходят хвойные на 1,8 %. Наибольший процент дефолиации отмечается у тополей бальзамического (6,7 %) и пирамидального (5,7 %). Наименьший процент дефолиации зафиксирован у ели обыкновенной (1,3 %) и березы повислой (2,3 %). Среди объектов исследования деревьев с сильной степенью дефолиации не выявлено.

Изменчивость листовой пластинки

Фоновым признаком нарушения состояния дерева является изменение размеров листа/хвои. Полученные данные при ранжировании величин составили вариационный ряд, показатели которого отличаются друг от друга на десятую долю единицы у ели, лиственницы; и на единицу — у остальных объектов (табл. 2).

Таблица 2

Классы вариант длины листовой пластинки (часть объектов)

Вид	Показатель	Классы вариант							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ель обыкновенная	Длина хвои, см	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5			
	Встречаемость вариант, шт	2	10	14	17	7			
Сосна обыкновенная	Длина хвои, см	4,5	5,5	6,4	7,5				
	Встречаемость вариант, шт	2	21	26	1				
Лиственница сибирская	Длина хвои, см	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	Встречаемость вариант, шт	3	4	9	10	8	7	6	3
Тополь бальзамический	Длина лист. пластинки, см	6,4	7,6	8,4	9,5	10,4	11,3		
	Встречаемость вариант, шт	4	4	12	18	10	2		

Вид	Показатель	Классы вариант							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Береза повислая	Длина лист. пластинки, см	3,5	4,5	5,4	6,4				
	Встречаемость вариант, шт	1	11	23	15				
Вяз гладкий	Длина лист. пластинки, см	3,9	4,5	5,5	6,2				
	Встречаемость вариант, шт	2	23	20	5				
Тополь белый	Длина лист. пластинки, см	4,5	5,4	6,4					
	Встречаемость вариант, шт	19	26	5					
Тополь пирамидальный	Длина лист. пластинки, см	2,5	3,5	4,4	5,4	6,4	7,2	8,0	
	Встречаемость вариант, шт	1	4	11	16	10	7	1	

Фактические данные по изменчивости листовой пластинки сравнивались с литературными данными. Отмечаются отклонения как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения от нормы исследуемого признака. Хвойные породы (ель, сосна, лиственница) имели малое количество вариантов встречаемости параметров длины листовой пластинки, и необходимость перевода данных в классы вариант признака при этом отпадала, тогда как у лиственных пород отмечался довольно большой разброс показателей, затруднявших построение полигона распределения признака и выявления характера приспособленности.

Наиболее высокая вариабельность признака отмечалась у тополей пирамидального и бальзамического. Выстраиваемая при построении полигона распределения признака кривая позволяет констатировать смещение показателя длины хвои в сторону увеличения, а листовой пластинки — в сторону уменьшения, что отражает характер приспособления растений к окружающей нагрузке.

Устойчивость древесных растений к техногенному загрязнению

При селективном отборе древесных пород для создания зеленых зон и колец г. Петропавловска предпочтение отдавалось и отдается прежде всего породам, являющимся коренными обитателями СКО — они неприхотливы к условиям произрастания, засухо- и морозоустойчивы, отличаются быстрым ростом, относительно устойчивы к промышленной нагрузке.

Растения являются надежными индикаторами загрязнения природной среды различными поллютантами, они не могут быть нейтральны к стрессовому воздействию и вынуждены адаптироваться к окружающему миру с помощью различных компенсаторных механизмов организма.

Закрепление и оценка этих изменений дают реальную картину состояния растительности и отражают состояние городской среды. Негативное воздействие загрязнения воздуха влияет прежде всего на листья растений. Определение поливариантности ответных реакций городских древесных растений на состав продуктов техногенеза в окружающей среде, выражающихся в изменении размеров листовых пластин, позволяет сделать вывод о функционировании комплекса механизмов, адаптированных на физиологическом уровне, направленных на стабилизацию энергетических потерь в условиях стресса [11].

Вариабельность изменения размеров листовых пластинок при одинаковых условиях произрастания древесных растений по большей части неспецифична. Наименьший коэффициент вариации, то есть большая адаптивная способность к условиям окружающей среды, отмечается у хвойных: V_{cp} — 7,46; лиственные менее устойчивы: V_{cp} — 13,3, — что может быть связано с ежегодной сезонной дефолиацией (табл. 3).

Таблица 3

Статистические показатели вариантов (часть объектов)

Порода	Показатели		
	X	σ	V
<i>Хвойные породы</i>			
Ель обыкновенная	1,3	0,461	3,46
Сосна обыкновенная	5,91	0,466	8,47
Лиственница сибирская	1,15	0,920	8,0
В среднем			7,46
<i>Лиственные породы</i>			
Тополь бальзамический	9,1	1,436	15,7
Тополь белый	5,2	0,601	12,3
Тополь пирамидальный	5,5	1,112	20,3
Береза повислая	5,4	0,600	10,9
Вяз гладкий	5,1	0,510	10,03
В среднем			13,3

Анатомо-метрические исследования листовых пластинок

Адаптивные изменения растений к окружающей среде проявляются не только внешне, большим изменениям подвержены растения и на клеточном уровне. Пограничная ткань, которая реагирует на внешнюю нагрузку первой — эпидерма. Ткань представляет собой комплекс клеток различной морфологии, размеров и выполняемых функций. Известно, что клетки ксерофитов имеют извилистую форму и малые размеры. Такие же признаки проявляются у растений неблагоприятных для них мест обитания (характер приспособления). При анализе морфологии основных покровных клеток верхнего и нижнего эпидермиса учитывались следующие параметры — форма и характер стенок (табл. 4).

Таблица 4

Морфология основных эпидермальных клеток (часть объектов)

Вид	Клетки верхнего/нижнего эпидермиса			
	Характер клеточных стенок		Форма	
Барбарис обыкновенный	П	СлВ	продолговатая	изодиаметрическая
Береза повислая	П		продолговатая	продолговатая
Береза пушистая	П		продолговатая	продолговатая
Боярышник обыкновенный	П	СВ	продолговатая	изодиаметрическая
Вяз гладкий	П	СлВ	яйцевидная	продолговатая
Вяз мелколистный	П	СлВ	продолговатая	продолговатая
Дуб черешчатый	П		овальная	изодиаметрическая
Ива серебристая	П		продолговатая	продолговатая
Карагана древовидная	СлИ	СлВ	вытянутая	изодиаметрическая
Клен ясенелистный	П	СВ	овальная	изодиаметрическая
Рябина обыкновенная	П		продолговатая	продолговатая
Сирень белая	П		продолговатая	изодиаметрическая
Сирень обыкновенная	П	СлВ	яйцевидная	изодиаметрическая
Тополь бальзамический	П	СлВ	продолговатая	продолговатая
Шиповник обыкновенный	П	В	продолговатая	изодиаметрическая
Яблоня сибирская	П	СВ	овальная	изодиаметрическая

Примечание: П — прямолинейный, СВ — сильноволнистый, СлВ — слабоволнистый, В — волнистый, СлИ — слегка изогнутый.

По характеру положения клеточных стенок обнаружены прямолинейные, сильноволнистые, слабоволнистые, волнистые и слегка изогнутые клетки. Степень волнистости стенок эпидермальных клеток коррелирует с условиями произрастания растений. У особей, выросших при интенсивном освещении, волнистость выражена слабее в сравнении с затененными растениями [12]. Поскольку верхняя сторона листовой пластинки получает больше солнечного света, волнистость клеточных стенок на верхнем эпидермисе не выражена. Нижняя же часть находится в затенении, отсюда клеточные стенки приобретают волнистый характер. По форме описаны клетки продолговатые, изодиаметрические, яйцевидные, овальные и вытянутые. У всех исследованных образцов клетки оказались разнонаправленными.

Морфология устьичных клеток

Установлено, что у большинства изученных объектов листья амфистоматические, однако у боярышника, клена, барбариса и дуба — гипостоматические. Устьица разнонаправленные, у большинства образцов они стефаноцитного типа, у тополей — аноцитного, у караганы — актиноцитного. У большинства растений устьица непогруженные — находятся на одном уровне с соседними эпидермальными клетками (признак мезоморфности), тогда как у березы, караганы, сирени, шиповника и яблони устьица в той или иной степени погружены на абаксиальной или адаксиальной сторонах (признак ксероморфности). Разные виды растений неодинаково приспособляются на микроуровне к нагрузке окружающей среды.

Устьичный индекс — измерение поверхностной плотности устьиц, используемый для сравнения листьев разных размеров. На величину устьичного индекса оказывают решающее влияние относительная влажность и интенсивность света во время развития листа. Устьичный коэффициент рассчитывался по формуле А. Kastner (отношение числа замыкающих клеток устьиц к общему числу клеток эпидермы на единице ее поверхности). Результаты исследования устьичного коэффициента представлены в таблице 5.

Наибольший показатель устьичного коэффициента выявлен у сирени (в период развития листа активно использовался солнечный свет, не было внешних агрессивных факторов). Наименьший показатель — у березы повислой (в период развития листа, возможно, отмечался недостаток как солнечного света, так и почвенной влаги).

Таблица 5

Устьичный коэффициент (часть объектов)

Порода	U_k	Порода	U_k
Береза повислая	10,5	Рябина обыкновенная	14,7
Боярышник обыкновенный	12,0	Сирень обыкновенная	28,1
Вяз гладкий	12,4	Тополь бальзамический	10,6
Карагана древовидная	14,3	Шиповник обыкновенный	13,5
Клен ясенелистный	18,4	Яблоня сибирская	22,7

Выводы

В результате проведенных исследований определено, что поллютанты разнонаправленно влияют на размеры листовей части городских древесных растений. Наименьший коэффициент вариации, то есть большая адаптивная способность к условиям окружающей среды, отмечается у хвойных: V_{cp} — 7,46, лиственные менее устойчивы: V_{cp} — 13,3. Полученные расчетные значения коэффициента вариации всех образцов $\leq 30\%$, что наглядно демонстрирует модификационная (ненаследственная, фенотипическая) изменчивость изучаемого признака. Очевидно, что зеленые насаждения г. Петропавловска требуют коренной реконструкции. При селективном отборе ассортимента древесных растений для зеленого строительства города, основной упор стоит делать на их устойчивость к экзогенным факторам окружающей среды. При озеленении населенных пунктов необходимо подбирать древесные растения, способные не только выживать в искусственных условиях, но и выполнять декоративные и водорегулирующие функции. При разработке проектов по озеленению на первый план выходят качество и экологические породные характеристики посадочного материала.

Литература

1. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / под ред. Р. Шуберт. М.: Мир, 1988. 348 с.
2. Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов европейской части России по программе ICP-FOREST (Методика ЕЭК ООН). Инструкция ФСЛХ РФ. М., 1995. 42 с.
3. Орлов А.И. Математика случая: учеб. пособие. М.: МЗ-Пресс, 2004. 170 с.

4. *Асланиди К., Вачадзе Д.* Биомониторинг. М.: Пушино. 1996. 23 с.
5. *Анели Дж.Н., Анели Н.А.* Способ получения микроструктурных отпечатков эпидермы различных органов растений // Сообщения АН ГрузССР. Тбилиси, 1986. С. 589–592.
6. *Баранова М.А.* Классификация морфологических типов устьиц // Ботанический журнал. 1985. Т. 70. № 12. С. 1585–1595.
7. *Kästner A.* Blättepidermis-Strukturen bei *Carlina* // Flora. Bd. 161. № 3. 1972. S. 225–255.
8. *Захаревич С.Ф.* К методике описания эпидермиса листа // Вестник Ленинградского университета, 1954. № 4. С. 65–75.
9. *Прозина М.Н.* Ботаническая микротехника. М.: Высшая школа, 1960. С. 206.
10. Методы оценки состояния лесных насаждений в системе мониторинга лесов при техногенном воздействии. (2015). URL: https://life-prog.ru/2_77292_metodi-otsenki-sostoyaniya-lesnih-nasazhdeniy-v-sisteme-monitoringa-lesov-pri-tehnogennom-vozdeystvii.html
11. Функционирование агроэкосистем в условиях техногенеза. (2016). URL: <https://helpiks.org/7-2067.html>
12. *Мирославов Е.А.* Структура и функция эпидермиса листа покрытосеменных растений. Л.: Наука, 1974. С. 184.

Literatura

1. Bioindikaciya zagryaznenij nazemny`x e`kosistem / pod red. R. Shubert. М.: Mir, 1988. 348 s.
2. Metodika organizacii i provedeniya rabot po monitoringu lesov evropejskoj chasti Rossii po programme ICP-FOREST (Metodika E`EK OON). Instrukcija FSLX RF. М., 1995. 42 s.
3. *Orlov A.I.* Matematika sluchaya: ucheb. posobie. М.: MZ-Press, 2004. 170 s.
4. *Асланиди К., Вачадзе Д.* Биомониторинг. М.: Pushhino. 1996. 23 s.
5. *Aneli Dzh.N., Aneli N.A.* Spособ polucheniya mikrostruktorny`x otpechatkov e`pidermy` razlichny`x organov rastenij // Soobshheniya AN GruzSSR. Tbilisi, 1986. S. 589–592.
6. *Baranova M.A.* Klassifikaciya morfologicheskix tipov ust`icz // Botanicheskij zhurnal. 1985. T. 70. № 12. S. 1585–1595.
7. *Kästner A.* Blättepidermis-Strukturen bei *Carlina* // Flora. Bd. 161. № 3. 1972. S. 225–255.
8. *Zaxarevich S.F.* K metodike opisaniya e`pidermisa lista // Vestnik Leningradskogo universiteta, 1954. № 4. S. 65–75.
9. *Prozina M.N.* Botanicheskaya mikrotexnika. М.: Vy`sshaya shkola, 1960. S. 206.
10. Metody` ocenki sostoyaniya lesny`x nasazhdenij v sisteme monitoringa lesov pri texnogennom vozdeystvii. (2015). URL: https://life-prog.ru/2_77292_metodi-otsenki-sostoyaniya-lesnih-nasazhdeniy-v-sisteme-monitoringa-lesov-pri-tehnogennom-vozdeystvii.html

11. Funkcionirovanie agroekosistem v usloviyax tehnogeneza. (2016). URL: <https://helpiks.org/7-2067.html>
12. *Miroslavov E.A.* Struktura i funkciya epidermisa lista pokrytosemennyx rastenij. L.: Nauka, 1974. S. 184.

I.V. Savenkova,

S.V. Pashkov

Bioecological Monitoring of Trees in Urban Environments

The anatomical structure and structure of the epidermal complex of the leaf plate of hardwood species in Petropavlovsk are studied. Peculiarities of the structure of the epidermal leaves of trees and shrubs, which makes green construction, have been revealed. Species differ in leaf type, morphology of major epidermal cells. The detected features of the epidermal structure can be used as additional diagnostic signs in monitoring anatomic and morphological studies on living samples.

Keywords: additional diagnostic indicators; indicators; bioindication methods; print (mold) of leaves epidermis; epidermic complex.