

СТАТЬИ

УДК 574.47(571.51)

**ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА
БИОИНДИКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

Соболева С.В., Есякова О.А., Почекутов И.С.

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,
Красноярск, e-mail: swet.soboleva2011@yandex.ru*

В работе приведена сравнительная характеристика биоиндикационной способности ели сибирской и сосны обыкновенной. В качестве объекта исследования использовался ассимиляционный аппарат ели сибирской и сосны обыкновенной. Отбор проб проводили в семи районах г. Красноярска, в качестве фона использовали пробы, отобранные в 23 км от краевого центра (в районе ст. Рябинино). Пробы анализировались на показатели средней арифметической длины хвои веток ели сибирской и сосны обыкновенной, влажность, зольность. Результаты сравнивали с фоном. Реакция растений на негативное воздействие атмосферы специфична и зависит от внешних факторов окружающей среды, характера и уровня воздействия, а также исходного состояния растительного организма. В результате проведенных исследований выяснили, что ассимиляционный аппарат ели в большей степени подвержен антропогенному воздействию в условиях городской среды, чем аппарат сосны. Отклонение от фонового, % арифметической длины хвои; влажности; зольности составило для: ели – 39,0; 16,1; 53,1; сосны – 16,2; 13,0, 42,0 соответственно. По результатам исследований можно сделать вывод о возможности использования сосны и ели в качестве биоиндикаторов городских экосистем. Полученные данные могут служить для оценки состояния загрязнения атмосферы и зонирования территорий.

Ключевые слова: экосистема, биоиндикация, сосна обыкновенная, ель сибирская, загрязнение атмосферного воздуха

**ASSESSMENT OF KRASNOYARSK ECOSYSTEM POLLUTION
BY BIOINDICATION METHOD**

Soboleva S.V., Esyakova O.A., Pochekutov I.S.

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk,
e-mail: swet.soboleva2011@yandex.ru*

The paper presents a comparative characteristic of the bioindication ability of Siberian spruce and pine. The object of the study was the assimilation apparatus of Siberian spruce and pine. Sampling was carried out in seven districts of the city of Krasnoyarsk, as the background samples were used, selected in 23 km from the regional center (near the station Ryabinino). The samples were analyzed for the average arithmetic length of needles of branches of Siberian spruce and pine, humidity, ash content. The results were compared with the background. The reaction of plants to the negative impact of the atmosphere is specific and depends on external environmental factors, the nature and level of exposure, as well as the initial state of the plant organism. As a result of the conducted researches it was found out that the assimilation apparatus of spruce is more subject to anthropogenic influence in the conditions of urban environment than the apparatus of pine. The deviation from the background, % arithmetic length of needles; humidity; ash content was for: spruce-39,0; 16,1; 53,1; pine-16,2; 13,0, 42,0, respectively. According to the results of the research, it can be concluded that pine and spruce can be used as bioindicators of urban ecosystems. The obtained data can be used to assess the state of atmospheric pollution and zoning of territories.

Keywords: ecosystem, bioindication, pine, Siberian spruce, atmospheric pollution

В современных условиях научно-технического прогресса все более актуальными становятся альтернативные инструментальные методы биологической индикации неспецифических поллютантов, поступающих в окружающую среду в результате хозяйственной и иной деятельности человека. В качестве биоиндикаторов могут выступать как растительные организмы, так и животные, обладающие способностью реагировать на происходящие изменения компонентного и количественного состава привычных условий обитания. Ответная реакция таких индикаторов возможна благодаря протеканию метаболических процессов в их организме более ускоренными

темпами по сравнению с адаптационными механизмами человека [1].

Определенные виды биоиндикаторов способны предоставить комплексную картину воздействия загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду от антропогенных источников загрязнения. В связи с этим в последнее время все чаще метод биоиндикации включают в программу мониторинговых исследований. Причем чем сложнее организация биологической системы, тем более тесная ее взаимосвязь проявляется с факторами среды обитания.

Одним из достоинств биоиндикационных методов является неспецифичность

реакции живого организма на воздействие поллютантов [2]. Такая способность биологического индикатора выявляется происходящими изменениями как при визуализации отличительных характеристик организма, так и его изменении метаболизма под влиянием разных антропогенных факторов, чем и обусловлена комплексность биоиндикации.

Выраженное отклонение в росте и развитии живого организма в условиях негативного воздействия факторов городской среды проявляется благодаря чувствительности биоиндикатора, а кумуляция эмиссии позволяет посредством экспериментальных исследований охарактеризовать положительную корреляцию между установленной концентрацией загрязняющих веществ в индикаторе и окружающей его среде.

Зачастую в качестве фитоиндикаторов применяются хвойные древесные насаждения, что обусловлено возможностью круглогодичных биоиндикационных исследований, высокой чувствительностью их ассимиляционного аппарата к загрязнителям, поступающим в растительный организм воздушным путем и приводящих к постепенному отмиранию хвои, сокращению срока ее жизни. Кроме того, хвойные насаждения все чаще используются в фитодизайне внешнего облика городов и повсеместно встречаются как в промышленных, так и жилых районах.

Цель исследования: оценка возможности использования ели сибирской и сосны обыкновенной по результатам анализа их ассимиляционных органов в качестве биоиндикаторов интенсивности аэрогенного загрязнения районов г. Красноярск.

Материалы и методы исследования

В работе оценивались изменения параметров хвои с контрольных и фонового участков. Основными характеристиками ассимиляционного аппарата являлись влажность, зольность, усыхание и повреждение хвои, накопления тяжелых металлов. В качестве объекта исследования использовали хвою ели сибирской и сосны обыкновенной, весьма чувствительных к воздействию поллютантов. Анализ хвои на усыхание проводился визуальным способом по пятибалльной шкале. С каждого пробного участка отбирались образцы хвои с десяти елей и сосен, проводились морфометрические ее замеры, после чего оценивалось общее состояние древостоев рабочих микроучастков. Полученные результаты усреднялись по районам города. Визуальные наблюдения позволили выявить выраженные изменения в структуре кроны деревьев, общем охвоении, продолжительности жизни, окраске и наличии заболеваний хвои. Поврежденную хвою отличали от здоровой по наблюдаемым хлорозам, наличию некротических пятен, некрозов. Морфометрические исследования включали в себя измерения линейных и объемных характеристик двухлетней хвои. Усредненные результаты получали в ходе двукратного измерения 100 хвоинок. Отбор проб проводили в пределах г. Красноярск, в качестве фона использовали пробы, отобранные в районе ст. Рябино. Отбор производился на высоте 1,2–1,3 м от земли. Влажность и зольность хвои определяли по общеизвестным методикам (ГОСТ 21769-84. Зелень древесная. Технические условия). Схема отбора проб приведена на рис. 1.

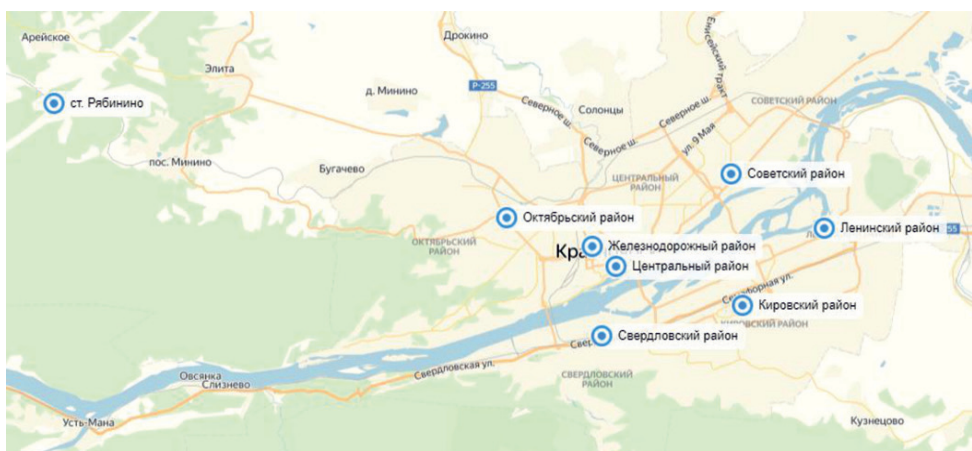


Рис. 1. Схема отбора проб

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Загрязнение атмосферного воздуха вызывает физиологические изменения в ассимиляционном аппарате объектов исследований, в том числе на уровне биохимических процессов в растительном организме, что приводит к трансформации внутреннего строения и свойств клеток. При накопительном эффекте загрязняющие вещества приводят к проявлению внешних изменений древесостоев. Наиболее наглядно отклонения наблюдаются у вегетативных органов древесных пород и чаще всего воздействие токсикантов выражается в уменьшении размеров и изменении окраски хвои, снижения общей охвоенности дерева [3]. В связи с этим целесообразно проводить оценку экологической обстановки территории по вариативности ассимиляционного аппарата, позволяющую оперативно, достаточно достоверно и без использования специального оборудования представить объективное описание степени загрязненности исследуемого района. Результаты метрических измерений представлены в табл. 1.

Анализ замеров длины хвоинок позволяет констатировать очевидное отличие определяемого параметра хвои деревьев фоновой участка от контрольных образцов, причем отклонение значений длины ели сибирской от фона в среднем составляет 39%, у контрольных образцов хвои сосны обыкновенной отклонение от фоновых показателей менее выражено и в среднем составляет 16%.

В фоновых древесостоях вследствие взаимного затенения хвои, из-за уменьшения их числа на вершине дерева и постепенного увеличения освещенности, показатели измерения линейных размеров и массы хвоинок возрастают от нижней части кроны к верхней [4]. При усилении воздушной

эмиссии подобная закономерность практически не выявляется.

Регулярное воздействие поллютантов вызывает адаптацию растительного организма к условиям произрастания, что проявляется в приобретении видоизмененной структуры и перестройки процессов функционирования организма путем изменения интенсивности обмена веществ в ассимиляционном аппарате. Негативное влияние токсичных химических соединений на растительный организм приводит к увеличению в нем скорости превращений, изменению компонентного состава и биопродуктивности, что является причиной варьирования физиологических показателей хвои. Биоиндикационный анализ позволяет выявить основные факторы, оказывающие как прямое, так и опосредованное влияние на специфичную реакцию растительного организма: климатические и метеофакторы окружающей среды, периодичность и уровень воздействия, а также исходное состояние биоиндикатора. Благодаря этому древесные насаждения могут быть использованы в качестве эффективных индикаторов воздушной эмиссии конкретной территории, оценки уровня ее загрязнения [5].

Обследование состояния хвои проводят по наличию повреждений на ней и степени усыхания ассимиляционного аппарата.

Анализ полученного обследования хвои показал, что наиболее загрязненными являются условия произрастания растений в Свердловском и Ленинском районах, степень повреждения хвои составляет 69 и 55% соответственно. Выявленные наблюдения подтверждаются высокой концентрацией производственных объектов и повышенной нагрузкой автомагистралей данных районов города. Причем во всех случаях ответная реакция растительного организма на внешние экологические факторы выше в случае применения ели сибирской в качестве биоиндикатора.

Таблица 1

Значение линейного параметра длины хвои сосны обыкновенной и ели сибирской, мм (июль 2019)

Район/ населенный пункт	Ель сибирская	Сосна обыкновенная
Советский	1,7 ± 0,1	6,3 ± 0,3
Центральный	2,2 ± 0,2	6,9 ± 0,3
Железнодорожный	1,7 ± 0,2	5,2 ± 0,3
Октябрьский	1,8 ± 0,2	5,4 ± 0,3
Свердловский	1,9 ± 0,2	5,6 ± 0,2
Кировский	2,1 ± 0,2	7,0 ± 0,4
Ленинский	1,8 ± 0,3	6,7 ± 0,2
Среднее значение	1,9 ± 0,2	6,2 ± 0,2
ст. Рябиново (фоновое)	3,1 ± 0,1	7,3 ± 0,2
Отклонение от фонового, %	39,0	16,0

Таблица 2

Результаты определения степени повреждения и усыхания хвои ели сибирской и сосны обыкновенной (июль, 2019)

Районы отбора проб	Состояние хвои обследовано	Количество хвоинок	
		100	
		Ель сибирская	Сосна обыкновенная
1	2	3	4
Центральный район	Повреждение* хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс	58	64
		24	24
		16	11
	Усыхание** хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс 4-й класс	83	85
		17	10
		0	5
0		0	
Железнодорожный район	Повреждение хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс	61	64
		26	33
		16	2
	Усыхание хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс 4-й класс	54	99
		38	1
		4	0
4		0	
Октябрьский район	Повреждение хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс	12	58
		86	39
		5	4
	Усыхание хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс 4-й класс	84	85
		16	10
		0	5
0		0	
Советский район	Повреждение хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс	11	86
		68	15
		22	2
	Усыхание хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс 4-й класс	90	95
		10	5
		0	0
0		0	
Свердловский район	Повреждение хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс	21	28
		12	31
		68	42
	Усыхание хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс 4-й класс	29	50
		15	12
		56	38
0		0	
Кировский район	Повреждение хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс	28	38
		47	43
		25	17
	Усыхание хвои: 1-й класс 2-й класс 3-й класс 4-й класс	72	98
		10	2
		8	0
10		0	

Окончание табл. 2			
1	2	3	4
Ленинский район	Повреждение хвои:		
	1-й класс	18	28
	2-й класс	27	17
	3-й класс	56	53
	Усыхание хвои:		
	1-й класс	80	84
2-й класс	19	12	
3-й класс	1	4	
4-й класс	0	0	
Станция Рябино	Повреждение хвои:		
	1-й класс	98	98
	2-й класс	3	2
	3-й класс	1	0
	Усыхание хвои:		
	1-й класс	100	100
2-й класс	0	0	
3-й класс	0	0	
4-й класс	0	0	

Примечание. *Класс повреждения хвои: 1 – хвоя без пятен, 2 – хвоя с небольшим количеством пятен, 3 – хвоя с большим количеством темных и жёлтых пятен, некоторые из них отмечаются во всю ширину хвои.

**Класс усыхания хвои: 1 – сухие участки отсутствуют, 2 – усох кончик 2–5 мм, 3 – усохла одна треть хвоинки, 4 – вся хвоинка пожелтела или более половины её длины высохла.

Таблица 3

Влажность хвои сосны обыкновенной и ели сибирской, % на а.с.с. (июль 2019)

Район/ населенный пункт	Ель сибирская, %	Сосна обыкновенная, %
Советский	54,0 ± 0,4	47,7 ± 0,3
Центральный	47,4 ± 0,2	50,9 ± 0,2
Железнодорожный	47,0 ± 0,3	51,7 ± 0,2
Октябрьский	45,7 ± 0,4	48,8 ± 0,2
Свердловский	47,6 ± 0,2	50,6 ± 0,3
Кировский	46,6 ± 0,1	50,4 ± 0,4
Ленинский	46,9 ± 0,2	50,8 ± 0,2
Среднее значение	47,9 ± 0,2	50,1
ст. Рябино (фоновое)	57,1 ± 0,1	57,6 ± 0,1
Отклонение от фонового, %	16,1	13,0

Немаловажным показателем состояния хвойных древостоев как элемента экосистемы является влажность. Влажность хвои определяли по общеизвестным методикам (ГОСТ 21769-84. Зелень древесная. Технические условия). Более наглядная возможность зонирования территории по уровню загрязнения воздушной среды выявлена по показателю влажности хвои, результаты определения которой представлены в табл. 3.

Как показывают экспериментальные данные, влажность хвои контрольных участков незначительно, но уменьшается под воздействием запыленного и загазованного атмосферного воздуха в связи с изменением плотности устьиц хвоинок,

определяющей площадь для газового обмена анатомических элементов хвои с атмосферой. Результаты измерения влажности в хвое согласуются с данными других авторов, что подтверждает зависимость между содержанием влаги в хвое и уровнем антропогенной нагрузки, что позволяет использовать показатель влагосодержания как индикатор экологического прессинга в условиях городской агломерации [6].

Загрязнение атмосферного воздуха, заключающееся в увеличении несвойственных для него минеральных компонентов, постепенно отражается на растительном организме, ухудшая функционирование и устойчивость насаждений. Такие измене-

ния объясняются тем, что минеральные вещества активно участвуют в обменных процессах растений и изменение качественного и количественного состава минералов, особенно тяжелых металлов, отражается в первую очередь на состоянии ассимиляционного аппарата. При проведении серии опытов по установлению минерального состава анализировались образцы хвои на всех исследуемых участках. Однако представительными в данном случае являлись зоны с наиболее интенсивной антропогенной нагрузкой. Данные по показателю зольности проб представлены в табл. 4.

В результате анализа полученных данных наблюдается динамика содержания золы в хвое древесных пород в сторону уменьшения при удалении от промышленных к лесным районам. Немаловажное значение при оценке уровня загрязнения территории имеет изменчивость содержания компонентов в хвое исследованных участков. Что можно наблюдать на при-

мере накопления тяжелых металлов в хвое ели обыкновенной, мг/кг (июль 2019 г.), как наиболее чувствительной древесной породы к аккумуляции поллютантов согласно данным табл. 4. Содержание минеральных компонентов в хвое представлены на рис. 2.

Согласно анализу данных, можно предположить, что поступление аэрозолей тяжелых металлов из воздуха и их накопление в хвое ели сибирской происходит как пассивным, так и активным путем от различных источников техногенного загрязнения, в том числе от автомагистралей, производственных площадок. Результат исследований показал, что содержание тяжелых элементов в хвое уменьшается по мере удаления места произрастания насаждений от источников эмиссии и достигает минимального в районе ст. Рябино по всем исследуемым компонентам. Полученные данные хорошо согласуются с проведенными ранее исследованиями на территории заповедника Столбы [7].

Таблица 4

Зольность хвои ели сибирской и сосны обыкновенной, % (июль 2019)

Район/ населенный пункт	Показатель зольности, %	
	Ель сибирская	Сосна обыкновенная
Советский	3,2 ± 0,22	2,0 ± 0,3
Центральный	2,1 ± 0,41	1,1 ± 0,1
Железнодорожный	2,6 ± 0,15	1,2 ± 0,2
Октябрьский	2,0 ± 0,31	1,0 ± 0,08
Свердловский	1,9 ± 0,14	1,6 ± 0,2
Кировский	1,9 ± 0,21	1,4 ± 0,1
Ленинский	7,6 ± 0,10	1,5 ± 0,2
Среднее значение	3,0 ± 0,25	1,4 ± 0,06
ст. Рябино	1,4 ± 0,22	0,8 ± 0,05
Отклонение от фонового, %	53,0	42,0

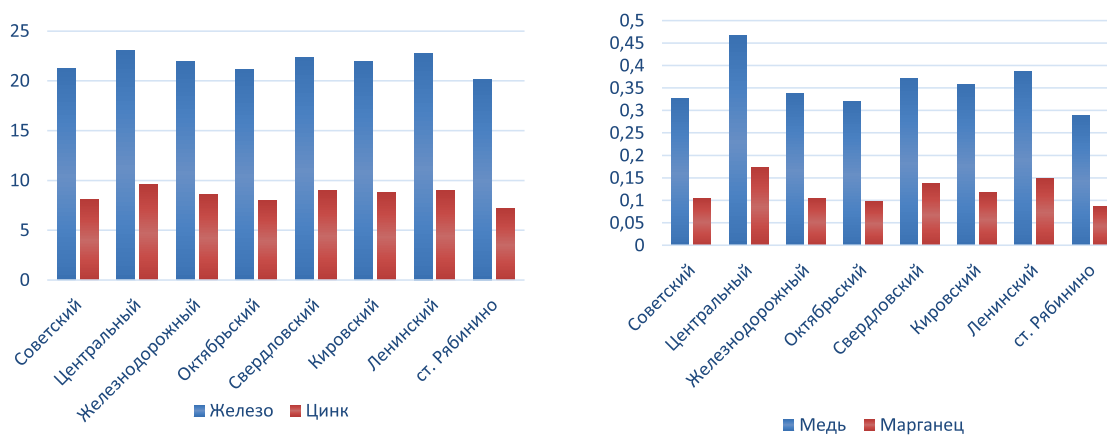


Рис. 2. Содержание тяжелых металлов в хвое ели сибирской, мг/кг (июль 2019)

Необходимо также отметить, что предложенный способ оценки экологического состояния территории посредством биоиндикационных показателей растительного организма с использованием ели сибирской и сосны обыкновенной достаточно прост в применении, не требует дорогостоящего оборудования и может осуществляться в полевых условиях при проведении экологического мониторинга.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что ассимиляционный аппарат ели сибирской в большей степени подвержен антропогенному воздействию в условиях городской среды, чем аппарат сосны обыкновенной. Отклонение от фонового, % арифметической длины хвои; влажности; зольности составило для ели – 39,0; 16,1; 53,1; сосны – 16,2; 13,0, 42,0 соответственно. По результатам исследований можно сделать вывод о возможности использования ели сибирской и сосны обыкновенной в качестве биоиндикаторов интенсивности аэрогенного загрязнения городских экосистем. Полученные данные могут служить для оценки состояния атмосферного воздуха и зонирования территорий.

Список литературы

1. Душкова Д.О., Горецкая А.Г., Евсеев А.В. Применение биоиндикационных методов при проведении мониторинговых исследований окружающей среды // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития: тезисы докладов Всероссийской научной конференции (Москва, 20–22 марта 2017 г.). 2017. № 2. С. 10–15.
2. Фуксман И.Л., Пойкалайнен И.Л., Шредере С.М. Физиолого-биохимическая индикация состояния сосны обыкновенной в связи с воздействием промышленных поллютантов // Экология. 1997. № 3. С. 213–217.
3. Есякова О.А., Степень Р.А. Влияние загрязнения воздушной среды [г. Красноярск] на компонентный состав ассимиляционного аппарата ели сибирской // Экологическая химия. 2009. Т. 18. Вып. 2. С. 93–98.
4. Кирпичникова Т.В., Шавнин С.А., Кривошеев А.А. Состояние фотосинтетического аппарата хвои сосны и ели в зонах промышленного загрязнения при разных микроклиматических условиях // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 1. С. 107–111.
5. Клевцова М.А., Михеев А.А., Якутин А.И. Экологическая оценка загрязнения воздушной среды биоиндикационными методами // Приволжский научный вестник. 2015. № 3–2 (43). С. 82–85.
6. Рыбак В.А. Интегральная оценка экологического состояния урбанизированных территорий // Научный вестник НЛТУ Украины. 2015. Вып 255. С. 135–145.
7. Воронин В.М., Соболева С.В. Изучение биоиндикационной способности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) // Материалы VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального координационного совета по современным проблемам лесоведения (Красноярск, 10–16 сентября 2018 г.). Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. С. 56–61.