

УДК 665.1:664.3.014

## АССИМИЛЯЦИОННЫЙ АППАРАТ ЕЛИ СИБИРСКОЙ КАК ИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ АТМОСФЕРЫ

О.А. Есякова, В.М. Воронин, Р.А. Степень

ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»  
660049 Красноярск, пр. Мира, 82; e-mail: olga-la83@mail.ru

Приводятся результаты морфометрических исследований хвои ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) – одной из весьма чувствительных к загрязнениям древесных пород. Установлена зависимость выхода эфирного масла от возраста хвои и уровня загрязнения атмосферы. Подтверждена возможность использования ассимиляционного аппарата ели сибирской в качестве биоиндикатора загрязнения воздушной среды по этим показателям.

**Ключевые слова:** ассимиляционный аппарат, морфометрия, эфирное масло, биоиндикация

The results of morphometric research of Siberian spruce needles (*Picea obovata* Ledeb.) - one of wood breeds, rather sensitive to pollution have been resulted. The dependence of essence output on age of needles and level of an atmosphere pollution has been established. The possibility of using of the assimilative apparatus of Siberian spruce as the bioindicator of air environment pollution by these parameters has been confirmed.

**Key words:** assimilative apparatus, morphometria, essence, bioindication

### ВВЕДЕНИЕ

Условия произрастания древесных растений в городе существенно отличаются от естественных. На их развитие сказывается влияние многих негативных атмосферных факторов, таких как: несвойственные им паро- и газообразные примеси, структура насаждений, иное физическое и микробиологическое сопровождение. В загрязненных зонах значительно изменяются фоновые концентрации химических компонентов, инсоляция, температура. Серьезные отклонения условий произрастания отражаются на метаболизме растений, прежде всего ассимиляционного аппарата, проявляются в его морфометрических показателях и компонентном составе.

Загрязнение атмосферы некоторых районов г. Красноярск исследовали по изменчивости морфометрических размеров и химических компонентов хвои ели сибирской – одной из весьма чувствительных к эмиссии древесных растений. Состояние ее ассимиляционного аппарата определяется неспецифичностью, общим загрязнением атмосферы (Захаров, 2000). Известно, что их воздействие вызывает сокращение продолжительности жизни хвои и изменяет ее морфометрические показатели – длину, ширину и толщину (Приступа, Мазепа, 1987; Николаевский, 1978). Загрязненность атмосферы, ее запыленность отражаются на влажности хвои и компонентом составе (Черненко, 1986).

Сокращение прироста, изреживание кроны, усыхание ветвей в ее верхней части и подобные признаки дают возможность судить о загрязнении атмосферы, то есть осуществлять биоиндикацию среды (Braekke, 1996; Helmisaary, 1990; Huttunen, 1985; Tikkanen, 1990/1991).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Высокая чувствительность к поллютантам и

возможность круглогодичного наблюдения делает ассимиляционный аппарат ели сибирской удобным индикатором для оценки состояния воздушной среды городских зон. При проведении исследований в разных районах г. Красноярск выбрано 13 и в лесных массивах в 30-70 км от краевого центра, в стороне от господствующих ветров, еще 3 участка молодняка ели сибирской. Охвоенные побеги для исключения индивидуальной изменчивости отбирали в середине кроны с 10-12 деревьев 15-20-летнего возраста в течение двух лет в сентябре, в период их подготовки к состоянию покоя.

При подготовке пробы отделенную от стволиков хвою 1, 2 и 3 года жизни раздельно измельчали до размеров 3-5 мм и в аппаратах Клевенджера из нее отгоняли эфирное масло. Его выход определяли волюмометрически с учетом влажности сырья. Компонентный состав анализировали методом ГЖХ на набивных колонках.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка загрязнения воздушной среды зон города непосредственно по размерам хвои экспрессна, но недостаточно оправдана. Так, длина хвои 2- и 3-го годов некоторых весьма загрязненных участков и лесного фонового отличается незначительным образом (табл. 1).

Для хвои ели отмечается закономерность, согласно которой размеры хвои 2-го года на 15-20, а 3-го года на 20-30 % больше первого года жизни. Спецификой городских посадок является, как правило, снижение длины и толщины последнего по сравнению с контролем. Для ширины такая зависимость не всегда наблюдается: в некоторых случаях она не меньше фоновой. Подобные изменения наблюдали и другие авторы (Приступа, Мазепа, 1987) при изучении произрастания сосны обыкновенной в техногенных условиях. По-видимому, положительный

эффект, обусловленный повышением температуры и содержания CO<sub>2</sub> в городе, не компенсирует снижения интенсивности солнечной радиации, ингибиторов роста и других негативных факторов.

Во второй и третий годы жизни темпы роста показателей хвои в городских условиях выше, чем в лесу. На городских участках ее прирост в длину и ширину на 2- и 3-ем году происходит в 2,5-3 раза, а в ширину – в 1,5 раза быстрее, чем в лесном массиве.

Превышение роста хвои в длину и толщину по сравнению с шириной отмечается при загрязнении воздушной среды сосновых фитоценозов (Приступа, Мазепа, 1987). По-видимому, это можно объяснить адаптацией растений к местным условиям и некоторыми позитивными возможностями среды к усилению фотосинтетических процессов.

Дополнительная информация может быть получена при сопоставлении поверхности и объема хвои деревьев разных участков, которые можно рассматривать как интегрирующие показатели, усредняющие ее морфометрическую структуру. В частности,

при сравнении видно, что если расхождение в их длине, ширине и толщине контрольных участков составляют 17-20 %, то по поверхности оно снижается до 2-4 % (табл. 1).

Полученные данные могут служить основанием для ориентировочного представления о том, что величина поверхности может рассматриваться в качестве показателя, характеризующего степень негативного воздействия окружающей среды на развитие ассимиляционного аппарата растений, то есть меру загрязненности среды. Представляется, что наиболее информативными являются данные по хвое первого года, в течение которого в большей мере происходит адаптация биосинтетических процессов к условиям произрастания растений. Исходя из этой предпосылки очевидно, что наименее загрязнена атмосфера в Академгородке, несколько больше – на ул. Республики и Центральном парке. Поверхности и объемы хвои 2- и 3 годов этих насаждений также отличаются незначительно.

**Таблица 1 – Влияние расположения участков произрастания ели на размеры хвои**

№№ пп	Место отбора, район города	Возраст хвои, год	Размеры хвои, мм			Поверхность, мм <sup>2</sup>	Объем, мм <sup>3</sup>
			длина	толщина	ширина		
1	ДК им. 1 Мая, Ленинский	1	13,4 ± 0,2	0,65 ± 0,02	0,91 ± 0,03	12,19	7,93
		2	17,5 ± 0,2	0,81 ± 0,02	0,98 ± 0,03	17,15	13,89
		3	18,9 ± 0,5	0,91 ± 0,02	1,05 ± 0,02	19,85	18,06
2	ТЭЦ -1, Ленинский	1	12,1 ± 0,3	0,74 ± 0,03	0,83 ± 0,04	10,04	7,43
		2	15,6 ± 0,3	0,99 ± 0,07	0,88 ± 0,05	13,73	13,59
		3	17,8 ± 0,3	1,04 ± 0,03	0,89 ± 0,04	15,84	16,48
3	Химкомбинат "Енисей", Ленинский	1	14,5 ± 0,5	0,73 ± 0,04	0,68 ± 0,04	9,86	7,20
		2	17,2 ± 0,4	0,74 ± 0,03	0,90 ± 0,05	15,48	11,46
		3	18,4 ± 0,7	0,76 ± 0,02	1,01 ± 0,07	18,58	14,12
4	КрАМЗ, Советский	1	10,4 ± 0,5	0,56 ± 0,02	0,68 ± 0,04	7,07	3,96
		2	15,2 ± 0,3	0,77 ± 0,03	0,90 ± 0,03	13,68	10,53
		3	16,9 ± 0,5	0,77 ± 0,03	1,01 ± 0,07	17,07	13,14
5	Парк Гвардейский, Советский	1	14,1 ± 0,4	0,80 ± 0,03	0,89 ± 0,04	12,55	10,04
		2	15,4 ± 0,3	0,92 ± 0,02	0,92 ± 0,03	14,17	13,03
		3	15,9 ± 0,3	1,06 ± 0,02	1,13 ± 0,04	17,97	19,05
6	Краевая больница № 1, Советский	1	14,0 ± 0,4	0,61 ± 0,03	0,93 ± 0,03	13,02	7,94
		2	14,8 ± 0,4	0,65 ± 0,03	0,99 ± 0,04	14,62	9,52
		3	15,5 ± 0,5	0,69 ± 0,04	1,01 ± 0,03	15,66	10,80
7	Центральный парк, Центральный	1	16,8 ± 0,4	0,72 ± 0,04	0,87 ± 0,04	14,62	10,52
		2	17,4 ± 0,5	0,79 ± 0,03	0,92 ± 0,04	16,01	12,65
		3	20,6 ± 0,4	0,86 ± 0,02	0,94 ± 0,02	19,36	16,65
8	ул. Республики, Железнодорожный	1	15,9 ± 0,2	0,79 ± 0,02	0,94 ± 0,03	14,95	10,46
		2	16,9 ± 0,2	0,73 ± 0,03	0,98 ± 0,02	16,56	12,09
		3	17,3 ± 0,4	0,87 ± 0,02	1,01 ± 0,01	17,47	15,20
9	Политехнический техникум, Свердловский	1	11,6 ± 0,2	0,68 ± 0,02	0,94 ± 0,04	10,90	7,41
		2	14,4 ± 0,3	0,88 ± 0,03	1,13 ± 0,03	16,27	14,32
		3	15,3 ± 0,2	0,94 ± 0,02	1,15 ± 0,03	17,60	16,54
10	Кировский исполком, Свердловский	1	13,8 ± 0,3	0,67 ± 0,02	0,95 ± 0,03	13,11	8,78
		2	17,8 ± 0,4	0,85 ± 0,04	1,09 ± 0,01	19,40	16,49
		3	18,1 ± 0,4	0,95 ± 0,02	1,14 ± 0,03	20,63	19,60
11	Академгородок, Октябрьский	1	14,4 ± 0,3	0,77 ± 0,03	0,97 ± 0,03	13,97	10,76
		2	15,1 ± 0,5	0,81 ± 0,05	1,05 ± 0,04	15,86	12,84
		3	16,7 ± 0,3	0,84 ± 0,03	1,06 ± 0,02	17,70	14,87
12	Дер. Слизнево, Емельяновский	1	19,9 ± 0,2	0,77 ± 0,03	0,91 ± 0,04	18,15	13,98
		2	21,3 ± 0,4	0,86 ± 0,04	0,98 ± 0,03	20,87	17,95
		3	22,1 ± 0,2	1,04 ± 0,03	1,05 ± 0,05	23,21	24,13
13	Ст. Кемчуг, Козульский	1	16,6 ± 0,3	0,94 ± 0,02	1,07 ± 0,04	17,76	16,70
		2	18,1 ± 0,1	0,96 ± 0,03	1,18 ± 0,05	21,30	20,45
		3	18,3 ± 0,4	0,98 ± 0,03	1,22 ± 0,05	22,33	21,88

Судя по морфометрическим показателям, существенно загрязнена атмосфера на основных автома-

гистралях и еще больше вблизи тепловых станций и крупных промышленных предприятий. Такое диф-

ференцирование городских зон достаточно отчетливо прослеживается как непосредственно по размерам хвои, так и по их поверхности и объему. Особенно угнетена ель на участке около КрАМЗа. Об этом, прежде всего, свидетельствуют размеры хвои 1-го года этих деревьев и их варьирование, существенно превышающее соответствующие изменения в других насаждениях, а также большое число хлорозов и некрозов. Главная причина их плохого состояния связана, вероятно, с наличием в выбросах предприятий фтористых соединений (Рожков, Михайлова, 1989).

Условия развития насаждений, в том числе обусловленные ими хлорозы и некрозы, отражаются и на влажности хвои, что отмечается как по зонам города, так и в онтогенезе. Как и в случае с морфометрическими показателями, тенденция ее снижения наблюдается в ряду лесные фитоценозы ( $54,7 \pm 1,0$  %), слабо ( $50,3 \pm 1,3$  %)-, средне ( $47,8 \pm 0,7$  %)-, сильно ( $45,2 \pm 0,4$  %)- и специфически

(44,3 %)- загрязненные насаждения. Процесс старения хвои также сопровождается снижением влажности. В 1-м году она на 3-10 % увлажнена больше, чем в последующие. При этом различие во влажности хвои 1-го и последующих лет обратно пропорционально интенсивности загрязнения зоны.

Более надежной считается оценка загрязнения аэрогенной среды по отклонению содержания продуктов метаболизма от нормы (Неверова, 2002; Сотникова, Степень, 2001). Удобными для этого считаются характеризующиеся достаточной временной стабильностью терпеноидные соединения ассимиляционного аппарата – эфирные масла (Степень и др., 1996; Фуксман, 1999; Bucher, 1982)

Помимо загрязнения среды и времени года, содержание масла изменяется с возрастом хвои. Его вклад в февральской хвое 1, 2 и 3-го годов не-, слабо-, средне- и сильнозагрязненных участков представлен в таблице 2.

**Таблица 2 - Содержание эфирного масла в хвое разного возраста и аэрогенного воздействия, %**

Возраст хвои, год	ст. Кемчуг	Академгородок	Центральный парк	Химкомбинат "Енисей"
1	$0,72 \pm 0,4$	$0,66 \pm 0,03$	$0,60 \pm 0,03$	$0,55 \pm 0,04$
2	$0,88 \pm 0,05$	$0,79 \pm 0,05$	$0,74 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,04$
3	$1,17 \pm 0,06$	$0,89 \pm 0,05$	$0,83 \pm 0,05$	$0,80 \pm 0,06$

Хвоя 2-го года насыщена терпеноидами на 20-30 %, а 3-го года – на 30-40 % больше по сравнению с первым. При этом в лесных массивах темпы их накопления выше, что, возможно, обусловлено меньшей скоростью дальнейших превращений в отсутствие загрязнения. Содержание масла в зимнее время в городских насаждениях, как уже отмечалось, ниже, чем в лесу. Это логично объясняется замедлением биохимических процессов в растениях в состоянии покоя.

Качественный состав эфирного масла хвои всех лет жизни практически одинаков, количественный – существенно изменяется в зависимости от загрязнения атмосферы насаждений. Отмечаемые результаты анализа закономерны, поскольку повышение концентрации реактивных примесей способствует ускорению протекания окислительных и других превращений терпеноидов. Об этом свидетельствует образование супероксидных радикалов в хлоропластах (Shimazaki, 1980) и изменение вклада в ассимиляционном аппарате в зависимости от интенсивности выбросов оксидов серы, разных по токсичности сульфатов и сульфитов (Фуксман, Пойкалайнен, Шредерс, 1997). Если при отсутствии или низком содержании эти процессы происходят через длительный промежуток времени, то при повышенном – они сдвигаются на более близкий период. В соответствии с таким представлением по мере загрязнения возрастает скорость превращения монотерпенов в их кислородные производные, что подтверждается экспериментально. Следовательно, в незагрязненной среде максимум монотерпеновых углеводородов отмечается в масле хвои 3-4 годов. Усиление загрязнения сдвигает его положение в сторону 1-го года жизни. Отсюда представляется, что отношение монотерпенов к другим компонен-

там эфирного масла определенного года жизни характеризует загрязненность среды (табл. 3).

По данному признаку насаждения достаточно отчетливо разделяются на 4 типа. К первому из них относятся фитоценозы с максимумом монотерпеновых углеводородов в эфирном масле хвои 3-го года. Их накопление происходит в течение всего ее существования с минимумом образования на первом году жизни. Во втором типе максимум монотерпенов смещается к хвое 2-го года. При этом разница их вклада в масле хвои 2- и 3-го годов существенно меньше, чем такового хвои 2- и 1-го годов. Основной причиной происходящих изменений, по-видимому, является иницирование примесями воздуха окислительных процессов.

Усиление загрязнения и, следовательно, ускорение окислительных процессов сдвигает максимум накопления монотерпеновых углеводородов к начальному периоду. В соответствии с этим, в третьем типе фитоценозов, хотя и наибольший вклад последних наблюдается в масле хвои 2-го года, его значение намного ближе к вкладу этих углеводородов в масле хвои 1-го года, чем 3-го. Дальнейшее развитие процессов обуславливает смещение максимального содержания монотерпеновых углеводородов к эфирному маслу хвои 1-го года жизни (4-й тип насаждений).

Исследования профилирования типа фитоценозов по компонентному составу эфирного масла ассимиляционного аппарата, в том числе и в связи с загрязнением атмосферы, ранее и более развернуто, хотя только на основе монотерпенов, проведены с сосной обыкновенной (Сотникова, Степень, 2001; Юмадилов, 1991). В частности, показано, что в лесных массивах преобладают «кареенистые», а на городских участках – «пиненистые» деревья.

**Таблица 3 - Изменчивость компонентного состава эфирного масла хвой ели сибирской в зависимости от загрязнения среды**

Возраст хвои, год	Вклад моно-терпенов, %	Вклад тяжелых фракций, %	Отношение монотерпенов к сумме остальных компонентов
<b>Незагрязненные, ст. Кемчуг</b>			
1	58,5	41,5	1,41
2	63,5	36,5	1,74
3	65,1	34,9	1,87
<b>Малозагрязненные, Академгородок</b>			
1	51,4	48,6	1,06
2	58,3	41,7	1,40
3	56,2	43,8	1,28
<b>Среднезагрязненные, Центральный парк</b>			
1	49,0	51,0	0,96
2	51,3	48,7	1,05
3	44,4	55,6	0,80
<b>Сильнозагрязненные, химкомбинат "Енисей"</b>			
1	50,4	49,6	1,02
2	44,5	55,5	0,80
3	40,1	59,9	0,70

В ходе исследований проведен сравнительный анализ влияния загрязнения атмосферы на морфометрические характеристики хвои ели сибирской, произрастающей в городской черте и в загородной зоне. Установлено, что их сопоставление может служить быстрым и дешевым методом оценки состояния воздушной среды городов.

Получены данные, согласно которым в ходе онтогенеза эфирное масло в хвое ели накапливается. Существенным признаком, влияющим на скорость его накопления, является мера загрязненности среды.

Таким образом, результаты исследований подтверждают возможность оценки состояния городской атмосферы по морфометрическим измерениям ассимиляционного аппарата и выходу и компонентному составу эфирного масла хвои ели сибирской.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Захаров, В.М. Здоровье среды: методика оценки / В.М. Захаров. - М.: Наука, 2000. - 129 с.  
 Неверова, О.А. Химический состав хвои ели в условиях техногенного загрязнения г. Кемерово / О.А. Неверова // Сиб. экологический журн. - 2002. - № 1. - С. 59-65.  
 Николаевский, В.С. Газоустойчивость растений / В.С. Николаевский. - Новосибирск: Наука, 1978. - 182 с.  
 Приступа, Г.К. Анатомо-морфологические изменения хвои сосны в техногенных условиях / Г.К. Приступа, В.Г. Мазепа // Лесоведение. - 1987. - № 1. - С. 58-60.  
 Рожков, А.С. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья / А.С. Рожков, Т.А. Михайлова. - Новосибирск: Наука, 1989. - 156 с.  
 Сотникова, О.В. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды / О.В. Сотникова, Р.А. Степень // Химия раст. сырья. - 2001. - № 3. - С. 74-81.  
 Степень, Р.А. Влияние техногенных выбросов на состоя-

ние природных лесов Красноярска / Р.А. Степень, Р.А. Коловский, Г.С.Калачева // Экология. - 1996. - № 6. - С. 410-414.  
 Физиолого-биохимическая индикация состояния сосны обыкновенной в связи с воздействием промышленных поллютантов / И.Л. Фуксман, [и др.] // Экология. - 1997. - № 3. - С. 213-217.  
 Фуксман, И.Л. Содержание  $\alpha$ -пинена в хвое сосны как оптимальный индикатор состояния древостоев в условиях техногенного загрязнения / И.Л. Фуксман // Экология. - 1999. - № 4. - С. 251-256.  
 Хемотипы популяции сосны обыкновенной в Башкирии / Н.Х. Юмадилов [и др.] // Раст. ресурсы. - 1991. - Т. 25, вып. 2. - С. 67-73.  
 Черненкокова, Т.В. Методика комплексной оценки состояния лесных биоценозов в зоне влияния промышленных предприятий / Т.В. Черненкокова // Пограничные проблемы экологии. - Свердловск, 1986. - С. 116-127.  
 Braekke, F.H. Needle analyses and graphic vector analyses of Norway spruce and Scots pine stands / F.H. Braekke // Trees. - 1996. - V. 11. - P. 23-33.  
 Bucher, I.B. Einfluss von SO<sub>2</sub> auf terpenemissionen von Kiefern (*Pinus silvestris* L.) / I.B. Bucher // Materials XII Intern. Arbeitstagang forstlicher Rauchschadensachverständiger, IUFRO, Oulu, 1982. - S. 1-4.  
 Helmisaary, H.-S. Temporal variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles / H.-S. Helmisaary // Scand. J. For. Res. - 1990. - V. 5. - P. 177-193.  
 Huttunen S. Seasonal sulphur contents of pine needles as indices of air pollution / S. Huttunen, K. Laine, H. Torvela // Ann. Bot. Fennici. - 1985. - V. 22. - P. 343-359.  
 Shimazaki, K. Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SQ-limugated leaves of spinach / K. Shimazaki, T. Sakaki, N. Kondo // Plant and cell physiol. - 1980. - V. 21, № 7. - P. 1193-1204.  
 Tikkanen, E. Nutrient stress in young Scots pines suffering from needle loss in a dry health forest / E. Tikkanen, H. Raitio // Water, Air and Soil Pollution. - 1990/1991. - V. 54. - P. 281-293.

Поступила в редакцию 6 февраля 2008 г.  
 Принята к печати 16 мая 2008 г.