

УДК: 630.187.1:630.425

## ИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ КРАСНОЯРСКА ПО МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ И ХИМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ХВОИ ЕЛИ СИБИРСКОЙ

© *О.А. Есякова, Р.А. Степень\**

*Сибирский государственный технологический университет (СибГТУ),  
пр. Мира, 82, Красноярск, 660049 (Россия) E-mail: sibstu.kts.ru*

Загрязнение атмосферы отражается на размерах хвои сибирской ели, и это позволяет судить о состоянии окружающей среды по их морфометрическими показателям. Отклонение в содержании и структуре эфирного масла как одного из продуктов обмена веществ несет информацию об этом более надежную. Данные показывают возможность оценки интенсивности загрязнения атмосферы по изменениям морфометрических и химических показателей хвои.

### ***Введение***

Обратной стороной промышленных достижений и благополучия является усиление загрязнения среды и пропорциональный ему рост числа заболеваний населения. Отсюда очевидна актуальность оценки экологического состояния территории городов и промышленных зон, ее дифференциация по этому признаку. Существующая оценка по ИЗО<sub>5</sub>, безусловно, представляет важную информацию о загрязнении. Однако в связи с большим разнообразием поллютантов, их сочетанным действием на организм о положении на конкретной территории обоснованнее судить по неспецифическим факторам. С учетом этого стали чаще применять методы биологической оценки, делающей возможным прямое определение качества среды, ее опасность для человека [1, 2]. Наиболее приемлемым и значимым для этой цели считается использование анатомо-физиологических и физиолого-биохимических методов анализа древесных растений, изменчивости содержания биологически активных веществ в их ассимиляционном аппарате.

Загрязнение воздушной среды территории Красноярска анализировалось по изменению морфометрических показателей и эфирного масла хвои ели сибирской. Данная древесная порода адаптирована к условиям Красноярской лесостепи и весьма чувствительна к загрязнению среды. Указывается на способность ее хвои активно поглощать аэрозоли, проникающие в полости и воздушные каналы листовой пластинки [3]. При этом реакция ассимилирующего аппарата ели неспецифична на поллютанты, отражая общий уровень воздействия химических соединений разной природы [4].

### ***Экспериментальная часть***

Объектами исследования служили 15–20-летние деревья ели сибирской, произрастающие на территории Красноярска, находящиеся под различным антропогенным воздействием. В качестве контроля взяты участки внутри лесных массивов в 40–60 км от города в стороне от господствующих ветров.

Отобранные на участке веточки привозили в лабораторию, хвою отделяли от стволиков и разделяли по годам. В каждом из образцов определяли влажность и размеры хвои. Кроме того, хвою в целом с наиболее загрязненного (Ленинский район, вблизи ТЭЦ-1, около основной магистрали) и фонового участков измельчали до размера частиц 3–5 мм и из нее гидродистилляционным методом отгоняли эфирное масло. Его выход определяли волюметрически с учетом растворения в кубовом конденсате. Компонентный состав образцов анализировали методом ГЖХ, идентификацию компонентов – с использованием ХМС.

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

### *Результаты и обсуждение*

Места отбора проб на территории Красноярска и лесных участков, а также длина, ширина и толщина хвои ели разных лет жизни этих насаждений приведены в таблице 1.

Оценка загрязнения воздушной среды отдельных зон города непосредственно по размерам хвои ели, произрастающей на его территории, затруднительна. Так, длина хвои 2 и 3-го годов весьма загрязненных участков №1 и 2 и фонового в лесном массиве вблизи ст. Кемчуг отличаются незначительно. То же самое отмечается при сравнении ширины хвои этих двух городских насаждений и участка у дер. Слизнево.

Вместе с тем для всех размеров хвои ели свойственна общая закономерность, заключающаяся в том, что ее показатели возрастают в процессе онтогенеза. В среднем длина хвои второго года жизни на 20%, а третьего – на 30% больше первого. Примерно такое же соотношение наблюдается при сравнении их ширины и толщины.

Таблица 1. Влияние расположения участков произрастания ели на размеры хвои

№ п/п	Место отбора, район города	Возраст хвои, год	Размеры хвои, мм		
			длина	ширина	толщина
1	ДК «Машиностроитель», Ленинский	1	13,4±0,2	0,91±0,03	0,65±0,02
		2	17,5±0,2	0,98±0,03	0,81±0,02
		3	18,9±0,5	1,05±0,02	0,91±0,02
2	ТЭЦ -1, Ленинский	1	12,1±0,3	0,83±0,04	0,74±0,03
		2	15,6±0,3	0,88±0,05	0,99±0,07
		3	17,8±0,3	0,89±0,04	1,04±0,03
3	Химкомбинат «Енисей», Ленинский	1	14,5±0,5	0,68±0,04	0,73±0,04
		2	17,2±0,4	0,90±0,05	0,74±0,03
		3	18,4±0,7	1,01±0,07	0,76±0,02
4	КрАМЗ, Советский	1	10,4±0,5	0,68±0,04	0,56±0,02
		2	15,2±0,3	0,90±0,03	0,77±0,03
		3	16,9±0,5	1,01±0,07	0,77±0,03
5	Парк «Гвардейский», Советский	1	14,1±0,4	0,89±0,04	0,80±0,03
		2	15,4±0,3	0,92±0,03	0,92±0,02
		3	15,9±0,3	1,13±0,04	1,06±0,02
6	Краевая больница №1, Советский	1	14,0±0,4	0,93±0,03	0,61±0,03
		2	14,8±0,4	0,99±0,04	0,65±0,03
		3	15,5±0,5	1,01±0,03	0,69±0,04
7	Центральный парк, Центральный	1	16,8±0,4	0,87±0,04	0,72±0,04
		2	17,4±0,5	0,92±0,04	0,79±0,03
		3	20,6±0,4	0,94±0,02	0,86±0,02
8	ул. Республики, Железнодорожный	1	15,9±0,2	0,94±0,03	0,79±0,02
		2	16,9±0,2	0,98±0,02	0,73±0,03
		3	17,3±0,4	1,01±0,01	0,87±0,02
9	Политехнический техникум, Свердловский	1	11,6±0,2	0,94±0,04	0,68±0,02
		2	14,4±0,3	1,13±0,03	0,88±0,03
		3	15,3±0,2	1,15±0,03	0,94±0,02
10	Исполком, Свердловский	1	13,8±0,3	0,95±0,03	0,67±0,02
		2	17,8±0,4	1,09±0,01	0,85±0,04
		3	18,1±0,4	1,14±0,03	0,95±0,02
11	Академгородок, Октябрьский	1	14,4±0,3	0,97±0,03	0,77±0,03
		2	15,1±0,5	1,05±0,04	0,81±0,05
		3	16,7±0,3	1,06±0,02	0,84±0,03
12	Дер. Слизнево, Емельяновский	1	19,9±0,2	0,91±0,04	0,77±0,03
		2	21,3±0,4	0,98±0,03	0,86±0,04
		3	22,1±0,2	1,05±0,05	1,04±0,03
13	Ст. Кемчуг, Козульский	1	16,6±0,3	1,07±0,04	0,94±0,02
		2	18,1±0,1	1,18±0,05	0,96±0,03
		3	18,3±0,4	1,22±0,05	0,98±0,03
14	Дер. Иннокентьевка, Уярский	1	17,5±0,3	1,01±0,03	0,84±0,02
		2	19,1±0,2	1,08±0,03	0,92±0,03
		3	19,8±0,3	1,11±0,03	0,96±0,03

Спецификой городских посадок является, как правило, снижение длины и толщины хвои первого года по сравнению с контролем. Для ширины такая зависимость проявляется не во всех случаях. В некоторых загрязненных насаждениях ширина хвои не меньше, чем в фоновых. Подобные изменения наблюдались и другими авторами [5] при изучении произрастания сосны обыкновенной в техногенных условиях. Можно предполагать, что положительный эффект, обусловленный повышением температуры и содержания CO<sub>2</sub>, в должной мере не компенсирует снижения интенсивности солнечной радиации, присутствия ингибиторов роста и других негативных явлений.

В последующие годы темпы наращивания показателей хвои в городских условиях выше, чем в лесу. На городских участках ее прирост в длину и толщину на 2- и 3-м году происходит в 2,5–3,0, а в ширину – в 1,5 раза быстрее, чем в массиве. Превышение роста в длину и толщину по сравнению с шириной отмечается при загрязнении воздушной среды сосновых насаждений [5]. По-видимому, это можно объяснить адаптацией растений к местным условиям и некоторыми позитивными возможностями среды к усилению синтетических 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 при существенном различии размеров хвои двух контрольных участков (№12 и 13) площади их поверхностей являются достаточно близкими. Если расхождение в их длине, ширине и толщине составляет 17–20%, то по поверхности оно снижается до 2–4%.

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, т.е. меру загрязненности среды. Представляется, что наиболее информативными являются данные по хвою первого года, в течение которого в большей мере происходит адаптация биосинтетических процессов к условиям произрастания растений. Исходя из этой предпосылки мы можем утверждать, что наименее загрязнена атмосфера в Академгородке (уч. №11), несколько больше – на ул. Республики (уч. №8) и Центрального парка (уч. №7). Поверхности и объемы хвои 2- и 3-го годов этих насаждений также являются близкими.

Судя по морфометрическим показателям, существенно загрязнена атмосфера около исполнкома Кировского района (уч. №10), краевой больницы №1 (уч. №6) и в парке «Гвардейский» (уч. №5). Еще худшее положение около ТЭЦ-1 (уч. №2), химкомбината «Енисей» (уч. №3) и политехнического техникума (уч. №9). Такое дифференцирование городских зон достаточно прослеживается как непосредственно по размерам хвои, так и по их поверхности и объему.

Значительно угнетена ель на участке около КрАМЗа (уч. №4). Об этом прежде всего свидетельствуют размеры хвои 1-го года этих деревьев и их варьирование, существенно превышающие соответствующие изменения в других насаждениях, а также большое число хлорозов и некрозов. Главная причина такого их состояния связана, по-видимому, с наличием в выбросах предприятия фтористых соединений [6].

Для уточнения надежности оценки загрязнения среды изучаются процессы метаболизма растений на разных участках, их отклонение от нормы. Удобными для этого считаются характеризующиеся достаточной временной стабильностью летучие терпеноидные соединения – эфирные масла [7].

С учетом этого для решения вопроса о влиянии загрязнения на физиолого-биохимические процессы в организме и сроки его воздействия в течение года сравнивали выходы и компонентный состав эфирных масел фонового и сильнозагрязненного участков ели. Результаты количественного определения его содержания в хвое молодняка одной из наиболее загрязненных посадок (уч. № 2, вблизи ТЭЦ-1) и фонового фитоценоза в Уярском районе (45 км от Красноярска) приведены в таблице 2.

Характер сезонных изменений одинаков для обоих участков, но антропогенное загрязнение воздушной среды вносит заметные корректизы как в содержание эфирного масла в хвое, так и динамику его накопления. В интенсивно загрязненных зонах, как это ранее отмечалось О.В. Сотниковой на примере сосняков [7], его вклад снижается. То же самое наблюдается и в сравниваемом случае, когда содержание эфирного масла в хвое лесного массива в среднем на 9% выше, чем на участке в Ленинском районе. Вместе с тем, начиная с июня и заканчивая октябрьем, его вклад в городском насаждении одинаков или даже несколько выше уровня масла лесного участка. Представляется, что при анализе хвои городских участков получаются заниженные результаты. Известно, что эмиссия экзометаболитов, основой которых в хвойных фитоценозах являются летучие терпеноиды, заметно возрастает при увеличении температуры окружающей среды [8]. Она же в городских условиях несколько выше по сравнению с лесными территориями, следовательно, интенсивность их улетучивания значительно.

Таблица 2. Сезонная динамика содержания эфирного масла хвои ели городского и лесного насаждений, %

Время отбора, месяц	Лесной массив	Городской участок
Январь	0,79±0,03	0,62±0,03
Февраль	0,82±0,04	0,59±0,02
Март	0,94±0,04	0,74±0,03
Апрель	0,96±0,03	0,80±0,03
Май	0,79±0,04	0,71±0,02
Июнь	0,70±0,02	0,72±0,02
Июль	0,90±0,03	1,00±0,03
Август	1,00±0,03	1,02±0,03
Сентябрь	1,10±0,03	1,14±0,03
Октябрь	1,04±0,04	1,06±0,03
Ноябрь	0,94±0,03	0,78±0,02
Декабрь	0,90±0,03	0,73±0,03
$\bar{x} \pm m$	0,91±0,05	0,83±0,05
$\sigma_x$	0,130	0,179
$v, \%$	14,2	21,6

Предполагается, что увеличение содержания терпеноидных соединений в хвое обусловлено интенсификацией их биосинтеза как ответной реакции растительного организма на неблагоприятное воздействие среды. Возможно также, что обогащение ими хвои связано с воздействием некоторых процессов, идущих с образованием терпеноидов, под влиянием адсорбируемых организмом техногенных загрязнителей. Приводятся сведения, что в аналогичных условиях происходит накопление тканями и других вторичных метаболитов – фенольных веществ [9].

Основу эфирного масла хвои ели сибирской представляют монотерпеновые углеводороды, на которые приходится 60–65% общей суммы летучих терпеноидов. Их превалирующим компонентом является камfen. Значительная доля в масле приходится также на  $\alpha$ -пинен, 3-карен, лимонен (с  $\beta$ -фелландреном). Общая сумма этих углеводородов составляет до 80% фракции. С учетом этого изменение их содержания в составе масла может служить основанием для заключения о типе и специфике развития древесных растений, в частности, под воздействием неблагоприятных факторов. В состав эфирного масла хвои ели входят и другие компоненты, свойственные для хвойных древесных растений: сантен, трициклен,  $\beta$ -пинен, мирцен, фелландрены, терпинолен, терпинены.

Наибольший вклад в кислородсодержащую фракцию вносит борнилацетат – 25–35% от суммы всех компонентов масла. С учетом этого хвоя, как и древесная зелень в целом ели сибирской, может служить сырьем при выработке эфирного масла совместно с древесной зеленью пихты. Считается, что борнилацетат находится в тесной биогенетической связи с камфеном [10]. Вместе с другим представителем камфановой группы (камфорой) их вклад в еловое масло составляет около 40%. В состав кислородсодержащей фракции входят и другие производные монотерпенов: терпениолы, борнеол, терпенилацетат, фенхон, фенхол и т.д.

Представительство сесквитерпеноидов в эфирном масле хвои ели сибирской незначительно (2–5%). Их превалирующим компонентом являются кариофилен и лонгифолен, суммарный вклад которых составляет около 70% фракции. Кроме того, в составе масла найдены лонгициклен, изолонгифолен, муролены, кадинен и др.

Несмотря на значительные различия в условиях существования лесного и городского насаждений ели компонентный состав эфирного масла хвои отличается несущественно. Хотя в последнем из них и появляются дополнительные соединения, однако все компоненты, свойственные для елового масла незагрязненных фитоценозов, отмечаются в их составе. Вместе с тем вклад многих из них в сравниваемых образцах заметно различается (табл. 3).

При переходе от незагрязненного к загрязненному участку в эфирном масле хвои ели убывает содержание  $\alpha$ -пинена, лимонена, камфоры и особенно камфена и, напротив, возрастает доля кислородсодержащих соединений, прежде всего борнилацетата. Отмечаемые изменения, по всей вероятности, связаны с химическими превращениями, происходящими внутри организма под воздействием загрязнения атмосферы. Их наиболее крупнотоннажными компонентами в городах считаются оксиды серы и азота, выбрасываемые в основном тепловыми станциями и автотранспортом. Из воздуха они проникают в растения, создавая внутри них кислую среду. Известно, что в таких условиях камfen реагирует с органическими кислотами (муравьиной, уксусной и др.) с образованием эфиров борнеолов [11].

Таблица 3. Изменение компонентного состава эфирного масла ели при антропогенном загрязнении среды, % от суммы

Основные компоненты	Лесной массив			Городской участок		
	$x \pm \bar{m}$	$\sigma_x$	v, %	$x \pm \bar{m}$	$\sigma_x$	v, %
Трициклен	1,4±0,3	0,88	62,9	0,8±0,1	0,29	36,3
$\alpha$ -Пинен	13,4±1,6	3,86	28,8	8,6±1,7	4,53	52,6
Камfen	16,4±0,9	1,91	11,4	10,8±1,3	3,71	34,4
$\beta$ -Пинен	6,2±0,9	2,46	39,7	5,9±0,8	2,24	38,0
3-Карен	9,8±0,9	2,48	25,3	8,8±1,0	2,53	28,8
Лимонен + $\beta$ -фелландрен	13,3±2,0	5,38	40,5	9,7±1,7	2,92	30,1
Терпинолен	1,6±2,0	0,41	25,6	1,0±0,1	0,37	37,1
Всего монотерпенов		62,1			45,6	
Камфора	3,1±0,5	1,28	41,3	2,1±0,4	1,01	48,1
Изоборнеол	2,7±0,2	0,57	21,1	6,4±0,9	2,42	37,8
Борнилацетат	25,8±2,0	5,30	20,5	40,3±2,6	6,87	17,0
Кариофилен	1,6±0,3	0,78	48,8	2,6±0,3	0,77	29,9
Другие	4,9±0,9			3,2±0,7		
Всего кислород-содержащих и сесквитерпеноидных соединений		37,7			54,6	

Уксусная кислота относится к известным метаболитам хвойных древесных растений. Поэтому её взаимодействие с камфеном при участии в качестве катализатора серной кислоты вполне реально. По этой же причине из-за кислотности среды тормозится перевод этих эфиров в камфору. Прямое же окисление камфена в камфору происходит только при катализе процесса хромовой кислотой, что в условиях Красноярска маловероятно [12]. Это может служить объяснением уменьшения содержания камфена и камфоры и повышения концентрации борнилацетата при атропогенном загрязнении воздушной среды. Наличием кислой среды объясняется и уменьшение в эфирном масле  $\alpha$ -пинена и моноциклических терпенов (лимонена и  $\beta$ -фелландрена).

Приводятся сведения, что  $\alpha$ -пинен в присутствии серной кислоты частично превращается в смесь эфиров терпеновых спиртов, моноциклических терпенов и полимеров [13]. Монотерпены такого строения в этих условиях изомеризуются и полимеризуются преимущественно в димеры. Время удерживания последних близко с сесквитерпеноидами, чем, возможно, и объясняется некоторое увеличение вклада этой фракции в масле хвои ели загрязненных участков.

В незагрязненных и загрязненных насаждениях, даже без учета неидентифицированных, судя по расположению на хроматограмме кислородсодержащих соединений, их значение в анализируемом случае найдено равным соответственно 1,87 и 0,89. Эти показатели, отражающие протекающие в организме растений процессы метаболизма, объективнее морфологических определяют состояние насаждений и, следовательно, загрязнение среды. Исходя из этого они позволяют оценить надежность определения интенсивности загрязнения зоны, проведенного по изменению размеров хвои.

Результаты хроматографического анализа свидетельствуют о широком интервале значений этого показателя и его зависимости от места расположения участков. Отношение фракций монотерпенов и более тяжелых компонентов в эфирном масле хвои фоновых насаждений 1,95–1,79 ((дер. Слизнево, Иннокентьевка, ст. Кемчуг), малозагрязненных – 1,62 (Академгородок), среднезагрязненных – 1,47–1,35 (Центральный парк, ДК «Машиностроитель»), сильно загрязненных – 1,10–0,81 (ТЭЦ-1, парк «Гвардейский», больница №1, политехнический техникум, исполнком Кировского района) и специфического загрязнения участков – 0,68 (КрАМЗ). Несколько выделяются из этого ряда посадки на ул. Республики (1,24) и около химкомбината «Енисей» (1,17). Снижение вклада монотерпенов в первом случае объясняется запыленностью деревьев вблизи автотрассы. Известно, что эти соединения синтезируются лишь на свету и уменьшение интенсивности освещения тормозит их образование. Во втором случае, несмотря на выбросы промышленных предприятий, относительно слабая интенсивность движения автотранспорта смягчает условия биосинтеза монотерпенов. Полученные данные указывают на сравнительно высокую надежность оценки загрязнения среды по морфологическим показателям хвои.

### Выходы

Таким образом, при проведении исследований изучено содержание, состав и сезонная динамика эфирного масла хвои ели сибирской городских и лесных насаждений. В июне-сентябре в связи с интенсификацией

биосинтеза в ответ на неблагоприятное воздействие среды им более насыщена хвоя загрязненных, в остальное время – «чистых» участков. В компонентном составе масла первых из них преобладают монотерпеновые углеводороды, вторых – кислородсодержащие соединения, по отношению которых можно судить об аэрогенном загрязнении территории.

#### **Список литературы**

1. Захаров В.М., Кларк Д.Б. Биотест. Интегральная оценка здоровья экосистем и отдельных видов. М., 1993. 68 с.
2. Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М., 1999. 193 с.
3. Фомин Б.И. Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. СПб., 1992. Т. 14. 103 с.
4. Захаров В.М. Здоровье среды: методика оценки. М., 2000. 129 с.
5. Приступа Г.К. Анатомо-морфологические изменения хвои сосны в техноценозных условиях // Лесоведение. 1987. №1. С. 58–60.
6. Рожков А.С. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья. Новосибирск, 1989. 156 с.
7. Сотникова О.В., Степень Р.А. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды // Химия растительного сырья. 2001. №3. С. 74–81.
8. Степень Р.А., Репях С.М. Летучие терпеноиды сосновых лесов. Красноярск, 1998. 406 с.
9. Запрометов М.М. Фенольные соединения: распространение, метаболизм и функции в растениях. М., 1993. 272 с.
10. Кинтя П.К., Фадеев П.К., Акимов Ю.А. Терпеноиды растений. Кишинев, 1990. 151 с.
11. Рудаков Г.А. Химия и технология камфоры. М., 1976. 208 с.
12. Рудаков Г.А., Хоменко З.С., Арбина Т.Ф. Непрерывный способ получения уксусного эфира изборнеола из камфена // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1955. №5. С. 3–4.
13. Рудаков Г.А. Химия и технология камфоры. М., 1961. 224 с.

*Поступило в редакцию 16 мая 2007 г.*