

УДК 630*187.1:630*425:630*161:630*160(470.22)

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В СВЯЗИ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ

© 1997 г. И. Л. Фуксман*, Я. Пойкалайнен**,
С. М. Шредерс*, Г. К. Канючкова*, Л. А. Чиненова*

* Институт леса Карельского научного центра РАН, 185610 г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

** Лесной институт Финляндии, Лесная научно-исследовательская станция,
Кирккосааренти 7, ФИН-91500 Мухос, Финляндия

Поступила в редакцию 07.02.96 г.

Исследованы физиолого-биохимические показатели сосны обыкновенной лесных насаждений, подвергающихся аэротехногенному загрязнению в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината. В хвое определяли состав эфирных масел, содержание фенолов и серы. В качестве диагностического признака предполагается использовать изменения состава эфирных масел. Исследования выполнены в рамках международного проекта "Состояние лесов Карелии".

Воздействие на древесные насаждения промышленных токсикантов, в том числе двуокиси серы, приводит к ответной реакции со стороны многих физиологических показателей дерева. В большинстве работ, посвященных методам биохимической диагностики состояния лесных биогеоценозов, исследуются продукты основного обмена (Артамонов, 1986; Барахтенова, 1987; Израэль и др., 1988; Николаевский, Белокрылова, 1980; Юкнис, 1988). Они являются метаболически активными и обычно имеют сложную суточную динамику, что делает проблематичным использование их как индикаторов состояния растений (Шумейко, Осипов, 1994). Вторичные метаболиты большее время, чем продукты основного обмена, сохраняют информацию о воздействиях стрессов на растительный организм. Кроме того, известно, что любые нарушения в основном обмене влияют на характер и интенсивность вторичного метаболизма растений (Гетко, 1989).

Физиологические показатели ранней диагностики состояния древостоя должны быть количественными, достаточно простыми в измерении, хорошо воспроизводимыми.

В данной работе исследуются вещества вторичного метаболизма как физиологические показатели диагностики состояния древостоев в условиях техногенного загрязнения.

МЕТОДИКА

Исследования проводили в зоне влияния Костомукшского ГОКа в сентябре 1994 г., в период подготовки сосны к покою. Объектом являлась господствующая на данной территории сосна

обыкновенная. Восемь пробных площадей заложены в средневозрастных сосняках черничных на территории Карелии (4) и Финляндии (4) на разном расстоянии от комбината. В качестве диагностического органа выбрана хвоя, так как поллютанты воздействуют в первую очередь через листовую аппарат, и в его тканях раньше всего появляются изменения, вызванные эмиссиями. Боковые побеги сосны отбирали со средней части кроны десяти модельных деревьев на каждой пробной площади. Для анализов использовали одно- и двулетнюю хвою.

Содержание серы в хвое определяли по реакции с хлористым барием (Ринькис и др., 1987), фенолов – по реакции с п-нитроанилином (Александрова, Осипов, 1985). Состав эфирных масел – методом газо-жидкостной хроматографии (Степень, Климова, 1985; Фуксман, 1991). Анализы проведены в 2–3 повторностях. Полученные данные обработаны статистически (Леонтьев, 1966). Показатель точности (P) не превышал 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди газовых выбросов, загрязняющих атмосферу, на исследуемой территории по уровню загрязнения и токсичности первое место занимает сернистый ангидрид (Лазарева и др., 1992). Накопление SO_2 в атмосферном воздухе способствует его проникновению в ткани ассимилирующих органов, повышению содержания серы в хвое, что оказывает токсическое действие на организм. Изменение содержания серы в хвое является одним из физиологических критериев скрытых

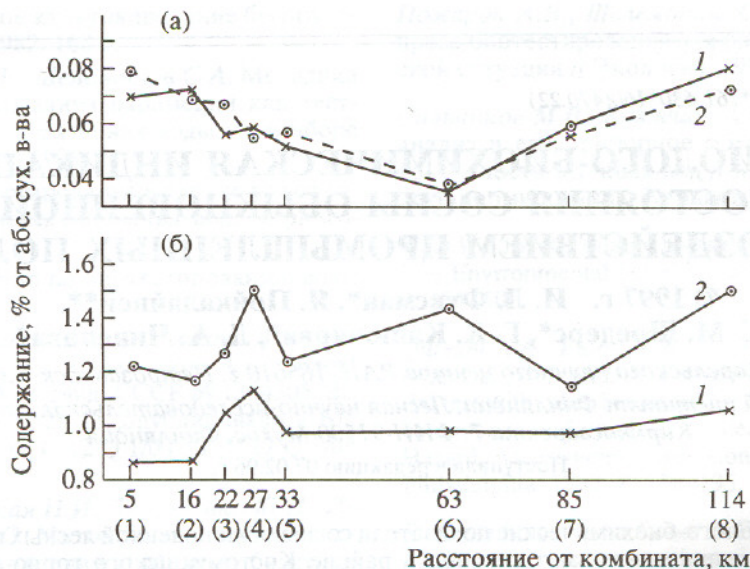


Рис. 1. Содержание серы (а) и фенолов (б) в хвое сосны первого (1) и второго (2) года жизни. В скобках – номер пробной площади.

нарушений метаболизма под влиянием поллютантов и степени их воздействия.

Повышенное содержание серы отмечено на пробных площадях 1, 2, 8 (рис. 1а). Самой чистой оказалась пробная площадь 6. В целом количество серы не превышает максимально допустимой величины – 0.12% (Батроева, 1990). Это свидетельствует о том, что метаболические емкости тканей хвои позволяют ей утилизировать дополнительное количество серы, поступающей с выбросами. Детоксикация серосодержащих эмиссий в тканях происходит благодаря наличию в них эндогенных путей метаболизации серы. По этим путям сернистый ангидрид выбросов окисляется в растении до высокотоксичного соединения – сульфита SO_3 , затем медленно превращается в менее токсичный сульфат SO_4 . При невысоких концентрациях в атмосфере диоксид серы почти полностью преобразуется в сульфат и не оказывает повреждающего действия. Тем не менее по величине накопления серы в хвое на данном этапе загрязнения можно выделить насаждения, испытывающие наибольшее воздействие.

Проведенные ранее в нашей лаборатории исследования углеводов, фосфорных и белковых соединений хвои сосны в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината свидетельствуют о некотором снижении ассимилирующей деятельности хвои на загрязненных территориях. Однако эти изменения слишком малы, чтобы быть статистически достоверными (Габукова, Ивонис, 1994). На загрязненных площадях определены и самые высокие концентрации гиббереллинов и ингибиторов роста – веществ терпеноид-

ной природы, вторичных продуктов метаболизма, среди которых наиболее активна абсцизовая кислота (дитерпен). Эти вещества могли бы быть хорошим индикатором состояния растений в сосновых насаждениях вокруг промышленных районов, если бы биотесты на них обладали хорошей воспроизводимостью и высокой точностью (Габукова, Ивонис, 1994).

Мишенью действия любого экстремального фактора являются клеточные мембраны, а на молекулярном уровне составляющие их компоненты – белки и липиды. Увеличение выделения веществ при повреждении мембран осуществляется за счет повышения проницаемости для многих метаболитов, которые ранее не могли преодолеть мембранный барьер, например фенолов. Другой путь заключается в том, что повреждение мембран ведет к активации ферментов, участвующих в деградации мембранных составляющих, и продукты этого процесса увеличивают количество выделяемых растением веществ. В результате процессов, вызванных повреждением клеток, происходит деградация липидов и белков (Мальхотра, Хан, 1988; Тарабрин, 1990), образуются летучие и нелетучие соединения, которые относят к так называемым стрессовым метаболитам, в том числе терпеноиды, фитогормоны (гибберелловая кислота, абсцизовая кислота) и фенолы (Моге, 1979). При этом вторичные метаболиты превращаются в активно действующие соединения (Рощина, Рощина, 1989). Они образуются из общего предшественника – фенилаланина, являющегося одним из конечных продуктов шикиматного пути. В физиологически активных тканях высших

растений фенольные соединения находятся в вакуолях в виде гликозидов. Если растительная клетка подвергается действию факторов, вызывающих стресс, то разрушение или увеличение проницаемости тонопласта приводит к выходу фенольных соединений в цитоплазму, где они окисляются до соответствующих хинонов. Они могут подвергаться полимеризации с образованием коричневых и черных продуктов. Реакция полимеризации может протекать и неэнзиматически.

Проведенные нами ранее модельные эксперименты по фумигации саженцев сосны сернистым ангидридом, а также опыт с имитацией кислотного дождя в регулируемых условиях также подтвердили данные о том, что одной из самых чувствительных реакций ранней диагностики состояния древостоя является изменение состава и содержания различных терпеноидных соединений, к которым относятся некоторые природные ростовые вещества, а также летучие терпеноиды, составляющие большую часть эфирных масел хвойных пород (Фуксман и др., в печати). Микроскопические исследования позволили сделать вывод о важной роли фенольных соединений в реакции клеток на воздействие поллютантов. Причем имеют место как накопление веществ фенольной природы, так и их превращения (Фуксман и др., в печати). Вызываемое поллютантом нарушение проницаемости мембран ведет к бесконтрольному окислению фенолов полифенолоксидазами. В конечном счете образуются меланины, присутствием которых в основном и объясняется темный цвет некротизированных клеток.

Отмеченные особенности согласуются с результатами исследований других авторов, выполненных на хвое сосны и ели, произрастающих в загазованной среде городов и в окрестностях промышленных предприятий (Soikkeli, 1981). Стрессовые условия не только способствуют освобождению и преобразованию уже имеющихся в клетке фенольных соединений, но и стимулируют фенольный метаболизм. Гербициды и природные ингибиторы могут увеличивать их содержание (Рощина, Рощина, 1989).

Нами установлено, что в двухлетней хвое содержание фенолов выше, чем в однолетней (см. рис. 16). Известно, что содержание фенолов в тканях растет с увеличением их возраста (Александрова, 1994). Как в однолетней, так и в двухлетней хвое увеличение содержания фенола наблюдается на пробных площадях 4 и 8, а в двухлетней хвое – и на площади 6.

Реакция растений в условиях загрязнения носит двухфазный характер. В первой фазе усиливается активность функциональных приспособительных реакций, в данном случае – усиленный синтез фенолов в хвое на загрязненных террито-

риях. Для второй – типично угнетение метаболических процессов. Видимо, длительное воздействие больших доз поллютанта на сосну, произрастающую вблизи от комбината (пробные площади 1, 2 и 3), приводит к снижению синтеза фенолов.

Высокочувствительной реакцией сосны на действие поллютантов является изменение состава и содержания эфирных масел. Установлено, что в хвое сосны под влиянием техногенных загрязнений возрастает относительное содержание наиболее летучих компонентов эфирных масел. В проведенных нами ранее экспериментах по фумигации саженцев сосны обыкновенной сернистым ангидридом содержание α -пинена в хвое уже через 15 мин после воздействия SO_2 увеличилось в 6 раз по сравнению с контролем (Фуксман и др., в печати). Многие исследователи (Зауралов, 1975; Рощина, Рощина, 1989) отмечают защитную роль эфирных масел в физиологических процессах, происходящих в организме растений в различных стрессовых ситуациях.

В районах Ленинградской области, подвергающихся интенсивному промышленному загрязнению, наблюдается существенное уменьшение содержания летучих веществ в хвое – примерно в 10 раз (Маслаков и др., 1994). Изменяется и качественный состав терпеновых соединений. В составе экстрагируемых из хвои сосны монотерпенов резко возрастает доля α -пинена (до 80%). И. Бухер (Bucher, 1982) при фумигации сосны сернистым ангидридом установил, что в хвое содержание α -пинена увеличилось в 5 раз, а камфена – в 10 раз по сравнению с контролем.

Методом газо-жидкостной хроматографии нами обнаружено в составе эфирных масел хвои сосны обыкновенной 26 компонентов. Основную долю их составляют монотерпены (около 60% от общего количества эфирных масел), количество сесквитерпенов и кислородсодержащих компонентов невелико. Максимум приходится на α -пинен, значительно содержание Δ^3 -карена, меньше – кариофиллена и лонгифолена.

Нами установлено (рис. 2), что в хвое сосны на наиболее загрязненных пробных площадях (1–4 и 8) в составе эфирных масел значительно возрастает относительное содержание наиболее летучих компонентов – α -пинена (до 46.0% от суммы эфирных масел) и Δ^3 -карена (до 22.0%). Как и для фенолов, максимальные значения α -пинена отмечены на пробных площадях 4 и 8. Длительное воздействие больших доз поллютантов на сосну, произрастающую вблизи от комбината, привело к снижению синтеза не только фенолов, но и легколетучих компонентов эфирных масел. Поэтому на пробной площади 1 мы не обнаружили большого количества α -пинена в хвое. Изучение

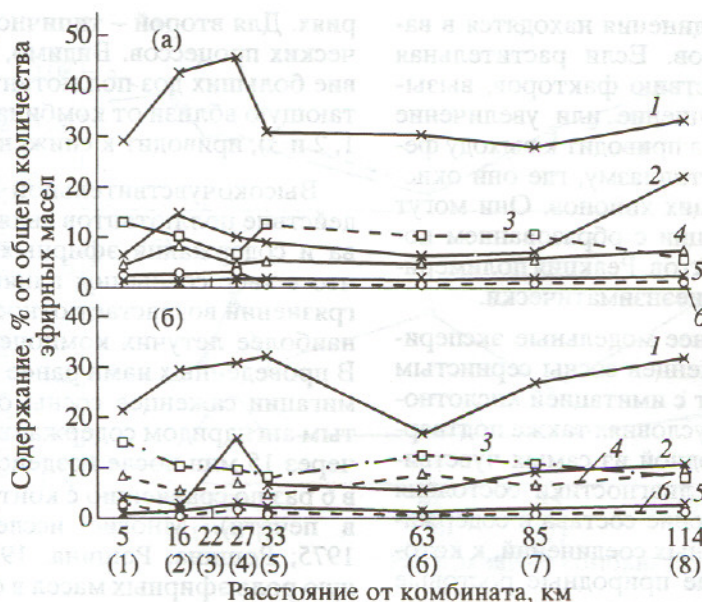


Рис. 2. Содержание основных компонентов эфирных масел в однолетней (а) и двухлетней (б) хвое сосны.

1 – α-пинен; 2 – Δ³-карен; 3 – кариофиллен; 4 – лонгифолен; 5 – камфен; 6 – β-пинен.

эфирных масел позволяет выявить характер наиболее быстрой ответной реакции растений на различные концентрации поллютантов.

Таким образом, вещества терпеноидной природы быстро реагируют на стрессовые воздействия загрязнений и могут являться индикаторами ранней диагностики состояния древостоя. Рационально в этом плане использовать эфирные масла. Метод определения их газожидкостной хроматографией несложен, не требует много времени и хорошо воспроизводим. Это является одним из важных условий выбора физиологического индикатора состояния древостоев.

В целом по результатам проведенных исследований можно констатировать, что к настоящему времени физиологические изменения в тканях диагностического органа – хвои сосны обыкновенной свидетельствуют о наступлении лишь скрытой фазы деградации растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Л.П. Биосинтез фенольных соединений в процессе формирования побега сосны обыкновенной: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 1994. 21 с.
- Александрова Л.П., Осипов В.И. Методика фракционирования фенольных соединений тканей хвойных // Исследование обмена веществ древесных растений. Новосибирск: Наука, 1985. С. 96–102.
- Артамонов В.И. Растения и чистота природной среды. М.: Наука, 1986. 175 с.

Барактенкова Л.А. Влияние сернистого газа на фотосинтетический метаболизм у растений // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1987. Вып. 2. С. 45.

Батроева А.А. Содержание серы в хвое пихты сибирской как показатель загрязнения атмосферы // География и природные ресурсы. 1990. № 3. С. 66–70.

Габукова В.В., Ивонис И.Ю. Влияние антропогенного загрязнения на физиологические процессы у сосны // Адаптация, рост и развитие растений. Петрозаводск, 1994. С. 141–152.

Гетко Н.В. Растения в техногенной среде. Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 211 с.

Зауралов О.А. О физиологическом значении эфирных масел в растениях // Растительные ресурсы. 1975. Т. 11. Вып. 2. С. 289–304.

Израэль Ю.А., Семенов С.М., Кунина И.М. Комплексный подход при осуществлении экологического нормирования загрязнения воздуха // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. Л., 1988. Т. 11. С. 10–22.

Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1966. 249 с.

Лазарева И.П., Кучко А.А., Кравченко А.В. и др. Влияние антропогенного загрязнения на состояние сосновых лесов Северной Карелии. Препринт доклада. Петрозаводск, 1992. 51 с.

Мальхотра С.С., Хан А.А. Биохимическое и физиологическое действие приоритетных загрязняющих веществ // Загрязнение воздуха и жизнь растений. М., 1988. С. 26–38.

Маслаков С.Е., Андреева М.В., Григорьева С.О. Содержание терпеновых соединений в хвое сосны и ели как индикатор состояния хвойных насаждений при мониторинге лесных экосистем // Охрана лесных экосис-

тем и рациональное использование лесных ресурсов. М., 1994. Т. 4. С. 49–50.

Николаевский В.С., Белокрылова Л.М. Механизмы окислительных процессов у растений под влиянием сернистого газа и перманганата калия // Газоустойчивость растений. Новосибирск, 1980. С. 5–17.

Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Куницкая Т.А. Методы анализа почв и растений. Рига, 1987. 196 с.

Рощина В.Д., Рощина В.В. Выделительная функция высших растений. М., 1989. 211 с.

Степень Р.А., Климова Л.С. Содержание и состав терпеновых компонентов эфирного масла отдельных частей сосны обыкновенной // Химия древесины. 1985. № 4. С. 101–106.

Тарабрин В.П. Физиолого-биохимические механизмы взаимодействия загрязнений и растений // Растения и промышленная среда. Днепропетровск, 1990. С. 64–71.

Фуксман И.Л. Эфирные масла элементов фитомассы *Pinus silvestris* L. // Растит. ресурсы. 1991. Т. 27. № 2. С. 73–81.

Фуксман И.Л., Габукова В.В., Ивонис И.Ю., Новицкая Л.Л., Шуляковская Т.А. Оценка использования

физиолого-биохимических показателей для ранней диагностики состояния лесных насаждений // Лесоведение (в печати).

Шумейко П.Т., Осипов В.И. Влияние атмосферного загрязнения на корреляционные связи между биохимическими показателями деревьев на примере сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) // Успехи современной биологии. 1994. Т. 113. № 4. С. 72–77.

Юкнис Р. Лесозокологические исследования и наблюдения в целях определения чувствительности лесных экосистем к загрязнению природной среды // Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Л., 1988. Вып. 6. С. 153–169.

Bucher I.B. Einfluss von SO₂ auf terpenemissionen von Kiefern (*Pinus silvestris* L.) // Materials XII Intern. Arbeitstagung forstlicher Rauchscadenssachverständiger, IUFRO, Oulu, 1982. S. 1–4.

Moore T.C. Biochemistry and physiology of plant hormones. New York; Heidelberg; Berlin: Spriger-Verlag, 1979. 74 p.

Soikkeli S. Comparison of cytological injuries in conifer needles from several polluted industrial environments in Finland // Ann. bot. Fennici. 1981. V. 18. № 1. P. 47–61.