

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГО-АНАТОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНОВ *PINUS SYLVESTRIS* L. В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

MORPHOLOGICAL-ANATOMICAL CHANGES OF VEGETATIVE ORGANS *PINUS SYLVESTRIS* L. UNDER MAN-MADE POLLUTION

V. Drozhzhina

Summary. In conditions of environmental pollution by emissions of man-made origin of various origins, there is a change in the quantitative and qualitative parameters of the vegetative organs of *Pinus sylvestris* L. There is a decrease in the growth of annual shoots, both in length and thickness, an increase in the number of needles, and the life expectancy of needles is shortened. Under the influence of pollutants, areas of the affected needles appear, drying is observed. The parameters of the needles are reduced, and changes in the resin-bearing system are observed. The number and diameter of resin passages are reduced, anomalies in their laying are noted: doubling of resin passages, necrotization of individual areas, filling with waste products, deepening of passages into the thickness of the mesophyll, underdevelopment of resin channels. The change in the length of the tissues forming the needles is most pronounced in a reduction in the main vein and an increase in the area of the sclerenchyma.

Keywords: hypoderm, mesophyll, bifurcation, resin passages, needles, endoderm, epidermis, *Pinus sylvestris* L.

Дрожжина Вероника Николаевна

Доцент, кандидат биологических наук, Воронежский
государственный педагогический университет
o.drozhzhin@gmail.com

Аннотация. В условиях загрязнения окружающей среды выбросами техногенного происхождения различного генеза наблюдается изменение количественных и качественных параметров вегетативных органов *Pinus sylvestris* L. Отмечено сокращение прироста годичных побегов, как в длину, так и в толщину, увеличение охвоенности, сокращается продолжительность жизни хвои. Под воздействием загрязнителей появляются участки пораженной хвои, наблюдается усыхание. Сокращаются параметры хвоинок, наблюдаются изменения в смолоносной системе. Сокращаются количество и диаметр смоляных ходов, отмечены аномалии в их заложении: удвоение смоляных ходов, некротизация отдельных участков, заполнение продуктами жизнедеятельности, углубление ходов в толщу мезофилла, недоразвитие смоляных каналов. Изменение в протяженности тканей, складывающихся хвоинку ярче всего, выражается в сокращении площади главной жилки и увеличении площади склеренхимы.

Ключевые слова: гиподерма, мезофилл, охвоенность, смоляные ходы, хвоя, эндодерма, эпидерма, *Pinus sylvestris* L.

Антропогенное воздействие на растительные организмы достаточно велико, вычлнить отдельные факторы в естественных условиях невозможно, и мы рассматриваем комплексное воздействие на растительный организм. Реакции растений на субклеточном, клеточном, тканевом и органном уровнях позволяют понять механизмы их адаптации к негативным условиям существования, использовать изменяющиеся показатели в их морфологии, анатомии и физиологии в целях мониторинга состояния окружающей среды. Индикаторные способности ряда растений отмечены давно, и сосна обыкновенная является одним из видов индикаторов загрязнителями различной природы. Растение отличается широким ареалом, является лесообразующей породой и используется в качестве тест объекта на многих территориях. Морфометрические и анатомические параметры хвои изменяются в зависимости от степени антропогенной нагрузки и уровня загрязнения. На основании глазомерной оценки состояния хвои разработаны шкалы повреждения хвои и усыхания по классам. На-

более информативными морфометрическими признаками являются: длина, ширина, высота, площадь поперечного сечения хвоинки, коэффициент флукутирующей асимметрии, охвоенность побегов, продолжительность жизни хвои [1, 2, 3, 4, 5]. Анатомические параметры, используемые в целях диагностики: толщина и процентное содержание или площадь, занимаемая тканями на поперечном срезе (эпидерма, гиподерма, мезофилл, главная жилка и ее составляющие). Характеристика смолоносной системы: количество, диаметр смоляных ходов, степень их развития и особенности заложения. Особенности строения устьичного аппарата: линейные показатели, количество устьиц на единицу площади [6, 7, 8, 9, 10].

Исследования проводились в Эртильском районе Воронежской области в 2018–2022 гг. На территории района были заложены 7 пробных площадок (ПП), в зонах с разным уровнем загрязнения. Эртильский район находится на северо-востоке Воронежской области на юге лесостепной зоны, процент, занятый лесами невелик

и составляет около 3,5 %, основной лесообразующей древесной породой является сосна обыкновенная.

Первая пробная площадка заложена на территории села Щучинские пески Эртильского района Воронежской области, на расстоянии 25 км от техногенных источников загрязнения.

Вторая и третья пробные площадки заложены в городе Эртиль на расстоянии 3 км от предприятий: ОАО «Завод растительных масел Эртильский», ОАО «Литейно-механический завод», ОАО «Эртильское АТП».

Четвёртая и пятая пробные площадки заложены в городе Эртиль. Площадки находятся в непосредственной близости от предприятий ОАО «Эртильский сахар», ОАО «Эртильский литейно-механический завод», МУП «Эртильское коммунальное хозяйство» и ОАО «Эртильский АТП».

Шестая площадка заложена в лесном массиве урочище Шелюга вдоль трассы «Курск-Борисоглебск-Панино-Эртиль» на удалении 10 метров от полотна дороги, но находится на большом расстоянии (25 км) от воздействия предприятий Эртильского района.

Седьмая площадка заложена в условно чистой зоне на территории села Борщевские Пески Эртильского района Воронежской области, на расстоянии 30 км от техногенного давления предприятий [11].

На каждой пробной площадке выбирались одновозрастные модельные деревья *Pinus sylvestris* L. по 10 модельных деревьев. Материалом для исследования послужили вегетативные побеги первого порядка первого года жизни, собранные в средней части кроны в конце вегетационного периода, с каждого модельного дерева по 10 побегов. Оценивались такие показатели хвои: длина, ширина, высота хвоинки, срок жизни, и площадь пораженных участков. Так же учитывалась длина, диаметр годичных побегов и их охвоенность. На микропрепаратах хвои изучали количество смоляных ходов, особенности их заложения, протяженность тканей и их процентное содержание. Срезы делались в средней части хвоинки, материал предварительно фиксировался в 70% спирте, исследования проводились по стандартным ботаническим методикам.

В работе использовался тринокулярный микроскоп Levenhuk MED 20T и окулярная видеокамера Levenhuk M 35 BASE. Статистическая обработка результатов выполнена с использованием пакета анализа данных Microsoft Excel 2010. Обоснование существенности различий исследуемых параметров выполнено с использованием параметрических тестов (критерий Стьюдента).

Прирост побегов в длину в условно чистой зоне составляет около 23 см, что совпадает со средними показателями по другим регионам в целом. Минимальный прирост дают побеги растений, произрастающих в непосредственной близости от автомобильной магистрали, он составляет 16,8 см, что на 30 % меньше контроля. Близкие показатели к контрольным у растений со второй ПП. За рост побегов отвечает верхушечная меристема, которая у хвойных отличается высокой чувствительностью к загрязнениям, так же, как и боковые меристемы стебля. Прирост стебля в толщину сокращается почти на 1/3, а точнее на 28 %. Угнетение показывают растения всех ПП, находящихся под воздействием промышленных токсикантов, не зависимо от удаленности их от источника загрязнения. В связи с сокращением прироста уменьшается количество хвои, расположенной на побеге, это может приводить к снижению интенсивности фотосинтеза.

Нами была проанализирована охвоенность годичных побегов, которая в нашей модификации представляет собой количество хвоинок на длину годичного побега. Как показывают исследования хвойных растений — это довольно вариабельный признак. Он зависит от целого ряда факторов: климатических условий, возраста и полноты развития исследуемых особей, возраста изучаемых побегов, географического положения модельных деревьев. Поскольку условия наших исследований выровнены, то мы считаем его показательным и информативным. В загрязненной зоне охвоенность годичного побега на 20 % меньше по сравнению с контролем. Если сравнить сокращение прироста и сокращение охвоенности (30 % и 20 % соответственно), можно сказать, что расположение брахибластов под влиянием поллютантов более частое по сравнению с контролем. Дефолиация на побегах первого года жизни наблюдается на изучаемых ПП крайне редко, если такие процессы и отмечены они идут на побегах начиная с третьего года жизни, средняя продолжительность жизни хвои составляет 3 года. В условиях полного благополучия возраст хвои может достигать 5–8-летнего возраста. На исследуемых площадках наибольшая продолжительность жизни 3,7 лет в среднем, при максимальном значении 5 лет и минимальном значении 2 года.

Параметры хвои в условиях загрязнения как правило сокращаются, однако данные по влиянию отдельных веществ и соединений на ростовые процессы весьма противоречивы. Вместе с этим, сосне свойственен большой полиморфизм данных признаков, который до сих пор слабо изучен. В большинстве случаев авторы соглашаются, что размеры хвои первого года жизни больше, чем второго, поврежденные участки хвои увеличиваются с возрастом, возраст хвои на загрязненных территориях уменьшается. Наши исследования показывают, что на загрязненных участках длина хвоинок первого года

жизни сокращается на 14 мм по сравнению с контролем, что составляет 25 %, то есть четверть длины. Как правило в прямой зависимости от сокращения длины хвоинок находится и сокращение их высоты и ширины, а, следовательно, и площади.

Процент поврежденной хвои составляет от 22 до 38 %, при этом мы учитывали хвою различных классов повреждения. В основном это точечные некрозы, которые соответствуют 2 классу повреждений. Хвоя, имеющая пятнистые некрозы, соответствующая 3 классу повреждений встречается реже и характерна в основном для побегов 2 и 3 года жизни. Так же повреждения 3 класса характерны для ослабленных особей, которые встречаются на всех пробных площадях. В этом случае играет роль индивидуальная устойчивость отдельных особей. Надо отметить, что на 4, 5 и 6 ПП встречаются растения, пораженные различными заболеваниями грибковой и вирусной природы, процент поврежденных особей больше чем на 1 и 7 площадках.

Если говорить о классах усыхания, то встречается хвоя 3 и 4 класса усыхания, однако процент такой хвои невелик и составляет 2 % в контроле, на загрязненных территориях — 3 %. Явления усыхания могут быть связаны с естественными процессами и климатическими условиями (см. таблицу 1, 2).

Таблица 1. Морфометрические показатели побегов *Pinus sylvestris*

№ ПП	Продолжительность жизни хвои, лет	Процент пораженной хвои %	Охвоенность, шт.	Прирост побега, см	Диаметр побега, см
1	3,7	24	42,31±0,35	22,64±0,22*	0,46±0,02
2	3,1	32	38,90±0,42***	19,23±0,21***	0,40±0,02*
3	3,1	33	38,72±0,34***	18,08±0,25***	0,38±0,03*
4	2,9	37	36,04±0,42***	17,82±0,19***	0,38±0,02**
5	3,0	34	35,35±0,41***	16,76±0,19***	0,37±0,02**
6	2,9	38	35,22±0,37***	16,81±0,13***	0,36±0,03**
7	3,7	22	43,13±0,44	23,32±0,20	0,50±0,04

Примечание: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001 (по отношению к контролю)

Таким образом, морфометрические показатели позволяют нам сделать предварительный вывод об уровне загрязнения исследуемых территорий. Вторая и третья пробные площадки, находящиеся в смешанных посадках на территории г. Эртиль, показывают средний уровень загрязненности. Наиболее серьезные изменения

Таблица 2.

Морфометрические показатели хвои *Pinus sylvestris*

№ ПП	Длина хвои, мм	Ширина хвои, мм	Высота хвои, мм
1	57,72±0,31	1,63±0,02	0,721±0,012
2	49,43±0,36***	1,55±0,03*	0,589±0,020**
3	49,06±0,40***	1,43±0,01***	0,610±0,014**
4	43,75±0,39***	1,40±0,02***	0,624±0,012**
5	43,58±0,38***	1,39±0,10*	0,613±0,016**
6	42,37±0,44***	1,33±0,09**	0,592±0,021**
7	57,91±0,30	1,65±0,03	0,701±0,025

Примечание: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001 (по отношению к контролю)

происходят на территории 4, 5 и 6 пробных площадок. Четвертая и пятая находятся в непосредственной близости от литейно-механического завода, шестая вблизи автомагистрали. Можно предположить, что уровень техногенной нагрузки здесь примерно одинаков. Первая пробная площадка характеризуется незначительными повреждениями хвои и практически неизменными показателями морфометрических параметров хвои и годичных побегов.

Изучение анатомического строения хвои в зоне загрязнения показывает уменьшение параметров эпидермы и гиподермы, по сравнению с контролем. На сильно поврежденной хвое можно проследить образование некрозов. Некроз затрагивает на начальных стадиях покровные ткани, а потом углубляется в мезофилл, вплоть до главной жилки (см. рисунок 1). Анализируя процентное содержание покровных тканей, можно сделать вывод, что оно практически не меняется. Варьирует только процентное содержание мезофилла и тканей главной жилки.

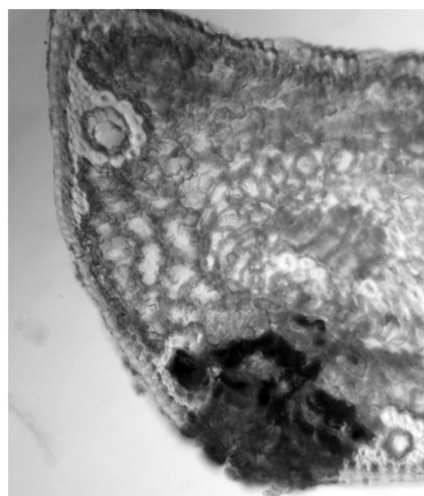


Рис. 1. Некротический участок на нижней стороне хвоинки (Увелич. 200)

Проводящая система сосны представлена двумя коллатеральными пучками, расположенными в центре под углом один к другому. Диаметр жилки уменьшается в 1,6 раз в зоне загрязнения. Загрязнители оказывают влияние на процессы фотосинтеза и транспирации, что в итоге изменяет весь ход метаболизма в хвое. В самой жилке, на загрязненных пробных площадках, уменьшается доля трансфузионной ткани и увеличивается объем тяжа склеренхимы.

Количество смоляных ходов является очень важным показателем для мониторинга уровня загрязнения. Хвоинка сосны обычно имеет 12–14 смоляных ходов, 6–8 из которых находятся на ее верхней стороне. У исследованных растений наблюдается уменьшение площади смоляных ходов, крайним вариантом является их некротизация, которая происходит из-за нарушения целостности клеток и тканей. На срезах смоляные ходы выглядят забитыми продуктами жизнедеятельности, видны отмирающие эпителиальные клетки (см. рисунок 2). Наиболее ярко реагируют смоляные ходы верхней стороны хвоинки. В зоне загрязнения ходы могут отсутствовать вообще или их количество сокращается до 1–2. Редукция смоляного хода может выражаться в появлении поражения на поверхности самой хвоинки, видимого невооруженным глазом. Редукция смолоносной системы наблюдается и на нижней стороне хвои. Это выражается в сокращении числа ходов, отсутствии отдельных структур и развитии на их месте тяжелой склеренхимы (см. рисунок 3).



Рис. 2. Смоляные ходы хвоинки, заполненные секретом (Увелич. 200)

В некоторых случаях склеренхимная обкладка на оставшихся ходах значительно усиливается. На отдельных микропрепаратах наблюдается нарушение ориентации заложения ходов, и они уходят в толщу мезофилла (см. рисунок 4). Иногда происходит сближение ходов, и они оказываются очень близко друг к другу (см. рисунок 5).

С уменьшением линейных размеров хвоинки умень-

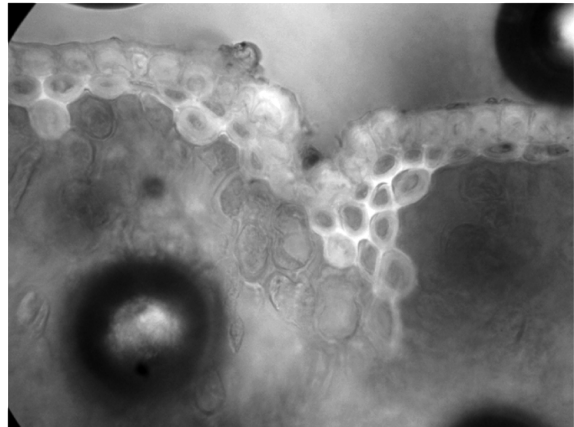


Рис. 3. Редукция смоляного хода в хвоинке (Увелич. 400)

шается протяженность эпидермы и гиподермы. Уменьшается площадь поперечного сечения хвоинки и главной жилки. Изменения достоверны по отношению к контролю. Сокращение количества смоляных ходов на разных площадках достоверных изменений не показывает, однако отмечены отдельные особи сосны, характеризующиеся значительными качественными и количественными перестройками, очевидно в данном случае большую роль играет индивидуальная устойчивость отдельных растений по отношению к негативным воздействиям (см. таблицу 3, 4).

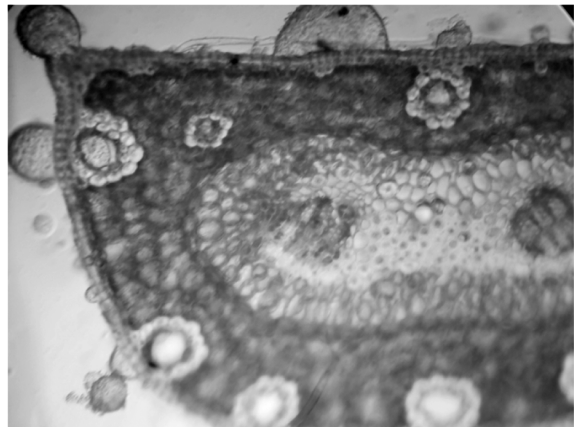


Рис. 4. Смоляной ход, погруженный в толщу мезофилла (Увелич. 200)

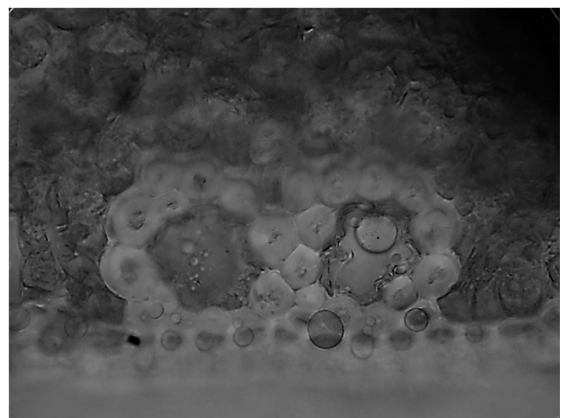


Рис. 5. Удвоение смоляных ходов в хвоинке (Увелич. 400)

Таблица 3.
Анатомические показатели хвои *Pinus sylvestris*

№ ПП	Толщина эпидермы, мкм	Толщина гиподермы, мкм	Площадь поперечного сечения хвоинки, мм ²	Площадь поперечного сечения главной жилки, мм ²
1	16,01±0,22	11,87±0,36	0,99±0,03**	0,40±0,03**
2	14,99±0,35*	10,15±0,42**	0,76±0,03***	0,33±0,02***
3	14,23±0,27***	9,07±0,38***	0,68±0,02***	0,35±0,01***
4	13,57±0,45***	9,13±0,44***	0,54±0,02***	0,33±0,01***
5	14,02±0,41***	10,12±0,33**	0,68±0,02***	0,39±0,02***
6	15,68±0,27	12,06±0,54	1,01±0,02*	0,41±0,02**
7	16,00±0,34	12,00±0,40	1,09±0,02	0,53±0,03

Примечание: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001 (по отношению к контролю)

Таблица 4.
Показатели смоляных ходов хвои *Pinus sylvestris*

№ ПП	Количество смоляных ходов, шт.	Диаметр смоляных ходов, мкм
1	11,23±2,57	98,15±10,64
2	10,12±2,08	68,19±10,88*
3	9,98±2,17	72,45±12,24*

№ ПП	Количество смоляных ходов, шт.	Диаметр смоляных ходов, мкм
4	8,54±3,01	72,37±11,88*
5	8,94±2,67	78,61±10,11*
6	9,25±2,94	80,28±10,72*
7	12,60±3,20	117,87±18,93

Примечание: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001 (по отношению к контролю)

Воздействие выбросов промышленных предприятий и автотранспорта на вегетативные органы сосны обыкновенной проявляется в изменении количественных и качественных параметров стебля и хвои. Хвоя годичных побегов уменьшается в размерах, в сторону уменьшения протяженности изменяются параметры тканей, складывающихся лист. Наблюдаются нарушения в смоляной системе, что отражается в сокращении числа смоляных ходов, их некротизации, погружении глубоко в ткань мезофилла, удвоении и близком расположении отдельных ходов. В главной жилке отмечено увеличение доли склеренхимы, сближение между собой проводящих пучков и изменение формы жилки на поперечном срезе с овальной на более округлую. В стебле отмечается угнетение деятельности верхушечных и боковых меристем, что выражается в сокращении прироста.

ЛИТЕРАТУРА

- Соболева С.В., Есякова О.А., Воронин В.М. Оценка аэрогенного загрязнения с использованием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovate* L.) // Хвойные бореальной зоны. — 2020. — Т. 38. — № 3–4. — С. 115–122.
- Ярмишко В.Т., Игнатъева О.В. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на Европейском Севере России: структура, особенности роста, состояние // Сибирский лесной журнал. — 2021. — № 3. — С. 44–55.
- Соболева С.В. Изучение биоиндикационной способности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в условиях светлохвойной тайги / С.В. Соболева, В.М. Воронин, И.С. Почечутов // Хвойные бореальной зоны. — 2018. — Т. 36, № 1. — С. 108–114.
- Михайлова Т.А. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых лесов на примере Иркутской области / Т.А. Михайлова, О.В. Калугина, О.В. Шергина // Лесоведение. — 2020. — № 3. — С. 265–273.
- Цепордей И.С. Увеличение охвоенности побегов в широтном градиенте как компенсаторная реакция сосны обыкновенной на снижение суммы эффективных температур / И.С. Цепордей // Сибирский лесной журнал. — 2024. — № 2. — С. 68–73.
- Плюснина С.Н. Структура хвои сосны скрученной *Pinus contorta* Dougl и сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в экспериментальных культурах / С.Н. Плюснина, А.Л. Федорков, Р.Г. Гуляев // Лесной вестник. Forestry Bulletin. — 2024. — Т. 28, № 1. — С. 46–55.
- Хох А.Н. Влияние антропогенного загрязнения на морфолого-анатомические параметры и спектральные характеристики хвои сосны обыкновенной / А.Н. Хох, В.Б. Звягинцев // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. — 2021. — № 1(37). — С. 69–80.
- Тужилкина В.В. Структурно-функциональные изменения хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения / В.В. Тужилкина, С.Н. Плюснина // Лесоведение. — 2020. — № 6. — С. 537–547.
- Плюснина С.Н. Структурно-функциональная характеристика фотосинтетического аппарата подростка *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в подзоне средней тайги европейского Северо-Востока / С.Н. Плюснина, В.В. Тужилкина // Ботанический журнал. — 2021. — Т. 106, № 11. — С. 1072–1084.
- Морфолого-анатомические характеристики и пигментный состав хвои сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Г. Красноярск / В.В. Стасова, Л.Н. Скрипальщикова, Н.В. Астраханцева, А.П. Барченков // Сибирский лесной журнал. — 2022. — № 2. — С. 3–10.
- Дрожжина В.Н. Изменение параметров генеративных органов *Pinus sylvestris* L. в условиях техногенного загрязнения / В.Н. Дрожжина // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2023. — № 4–2. — С. 13–18.