

Дрожжина В.Н., Дрожжин О.С.

Воздействие промышленных токсикантов на структуру листьев *Populus tremula* L. (Salicaceae)

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

УДК 58.01/.07

**Воздействие промышленных токсикантов на структуру листьев
Populus tremula L. (Salicaceae)**

Дрожжина В.Н.¹, Дрожжин О.С.²

Воронежский государственный педагогический университет¹

Всероссийский научно-исследовательский ветеринарный институт патологии,
фармакологии и терапии (ФГБНУ ВНИВИПФит)²

Аннотация

Изучены изменения, происходящие в микроструктуре листа *Populus tremula* L. в зоне воздействия металлургического комбината. Реакция эпидермы проявляется в увеличении числа устьиц и основных клеток эпидермы на абаксиальной и адаксиальной стороне листовой пластинки, соответственно с уменьшением их линейных параметров. В непосредственной близости от источника загрязнения увеличивается значение устьичного индекса. Толщина мезофилла и общая толщина листовой пластинки в зоне загрязнения уменьшаются, тогда как толщина покровных тканей увеличивается, процент межклетников в мезофилле так же возрастает. В столбчатом мезофилле происходит увеличение прозенхимности клеток, как в первом, так и во втором ряду палисадных клеток.

Ключевые слова: КОЭФИЦИЕНТ ПАЛИСАДНОСТИ, МЕЖКЛЕТНИК, МЕЗОФИЛЛ, УСТЬИЦЕ, УСТЬИЧНЫЙ ИНДЕКС, ЭПИДЕРМА, *POPULUS TREMULA* L.

Введение

Представители рода *Populus* L. давно и успешно используются для городского озеленения, благодаря быстрым темпам роста, способности хорошо переносить обрезку и формирование кроны, большой пылеулавливающей поверхности листьев, фитонцидной активности. Имеются предложения использовать представителей рода в качестве индикаторов загрязнения окружающей среды [1-3].

Вид *Populus tremula* L. в городской черте встречается нечасто и приурочен к

Дрожжина В.Н., Дрожжин О.С.

Воздействие промышленных токсикантов на структуру листьев *Populus tremula* L. (Salicaceae)

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

крупным паркам, тогда как в естественных условиях произрастания это вторая по встречаемости порода. Оценка воздействия выбросов промышленных предприятий и выбросов автотранспорта на ассимиляционный аппарат чаще всего касается морфологических и морфометрических параметров, тогда как изменения на тканевом уровне рассматриваются реже, но они не менее информативны [4, 5]. В связи с этим нами были рассмотрены изменения морфолого-анатомических показателей листьев осины в условиях техногенной нагрузки.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в г. Липецке и Липецкой области в зоне воздействия ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Металлургический комбинат оказывает серьезное воздействие на окружающую среду и на его долю приходится 88% выбросов всех загрязняющих веществ в области. Пробные площади располагались согласно господствующей розе ветров в непосредственной близости от комбината (0,5 км) и на расстоянии 1, 3, 10 км от комбината (1, 2, 3, 4 П.П. соответственно). Контрольная П.П. заложена в Колодецком заказнике на расстоянии 35 км от источника выбросов (5 П.П.) в пойме р. Воронеж.

Сбор образцов проводили в конце августа, начале сентября 2020–2022 гг. Для анатомического анализа листьев отбирали по 10 штук с каждого модельного дерева (в количестве 3 шт.) из средней части побега. Препараты готовили из средней части листа [6]. На микроскопе «Jenamed», с помощью винтового окуляр микрометра измеряли протяженность тканей, размер и количество отдельных элементов. Морфометрические промеры делались с использованием штангенциркуля, площадь листьев измерялась с помощью планиметра LI-3100С.

Изучение анатомических особенностей листьев проводили на постоянных и временных препаратах мезофилла и эпидермы. Для исследования препаратов эпидермы брали как свежий, так и фиксированный материал. Для отделения эпидермы использовали мацерирующую жидкость (смесь Шульце) и бритву [7]. Процентное содержание межклетников в тканях листа определяли с помощью точечного интеграционного окуляра. Статистическая обработка материала проводилась в программе «Statistica».

В качестве объекта исследования выбран вид *Populus tremula* L. Встречается дерево

Дрожжина В.Н., Дрожжин О.С.

Воздействие промышленных токсикантов на структуру листьев *Populus tremula* L. (Salicaceae)

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

в степной и лесостепной зоне, может заходить в тундру, в горах не поднимается выше пояса лесов. Может образовывать чистые насаждения после пожаров на гарях или в случае вырубki основной породы. Входит в состав лиственных, смешанных и хвойных лесов. В некоторых случаях формирует небольшие леса – осинники или встречается в смеси с березой, образуя колки [8].

Порода светолюбивая, мезофит, предпочитает богатые почвы, но может расти и на любых субстратах, избегая переувлажненных и засоленных. Лесной вид, ареал Европейско-Азиатский, бореально меридианальный.

Дерево высотой до 30–35 м, может достигать возраста 220–250 лет, но средний возраст 90–100 лет. Крона округлая или яйцевидная, разреженная. Нижняя часть ствола покрыта темно-серой трещиноватой корой, верхняя часть гладкая серовато-зеленая. Форма молодых побегов на поперечном срезе цилиндрическая, побеги могут быть голыми или слегка опушенными.

Результаты исследования

Визуальная оценка состояния ассимиляционного аппарата *P. tremula* L. показывает, что площадь некрозов достигает 60% в сильно загрязненной зоне, велик процент повреждений и в зоне умеренного загрязнения. Можно предположить, что данный вид отличается высокой чувствительностью к токсикантам.

На развитие побегов и листьев в загрязненной зоне оказывают влияние накопление и передвижение токсических веществ в организме. Накопление ядовитых веществ в меристематических тканях вызывает развитие «уродливых» листьев или частичное разрушение листовой пластинки, а также отмирание верхушечной части побегов.

Развитие неполноценных листьев на побеге чередуется с развитием нормальных листьев, что связано с особенностями перераспределения ингибирующих веществ. Недоразвитые листья располагаются обычно в центре побега и принимают форму самых нижних на побеге, увеличивается доля обратно-треугольных листьев, часто верхушечные листья имеют недоразвитую или разрушенную верхушку.

Под воздействием токсикантов изменяется прирост побегов в длину и их облиственность. У осины наблюдается уменьшение прироста, вместе с тем показатели облиственности побегов на погонный метр могут как увеличиваться, так и уменьшаться.

Данный признак не стабилен и опираться только на него для оценки состояния растений не представляется возможным. Длина годичных побегов в контроле составляет в среднем 12 см, а в зоне воздействия неблагоприятных факторов около 8 см. Наиболее ценным и значимым показателем состояния растения является показатель ассимиляционной поверхности побега, который непосредственно связан с количеством синтезируемого органического вещества. В зоне воздействия загрязняющих веществ достоверно уменьшается ассимиляционная поверхность изучаемого вида, что напрямую связано с уменьшением линейных параметров листа. Уменьшение происходит практически в два раза (табл. 1).

Таблица 1. Морфометрические показатели побега *Populus tremula* L.

№ ПП	Облиственность побега, шт./1 п.м.	Прирост побегов, см	Ассимиляционная поверхность побега, см ²	Повреждение листьев, %
1	112,2±1,29***	8,2±0,55***	186,9±1,07***	60,9
2	109,4±1,26***	8,5±0,59***	193,6±1,09***	61,4
3	86,3±1,20***	11,7±0,53	233,1±1,10***	50,2
4	82,9±1,20***	12,3±0,49	266,1±1,21***	5,3
5	100,0±1,07	12,0±0,50	342,4±1,25	3

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

Листья осины серо-зеленые, округлые или широко яйцевидные черешчатые, длина черешка примерно равна длине листовой пластинки, черешки сплюснуты с боков, листорасположение очередное. Край листовой пластинки неравномерно выемчато-зубчатый, верхушка острая или округлая, основание сердцевидное, округлое до клиновидного. Листовая пластинка голая, либо опушена немногочисленными волосками, особенно в молодом возрасте. У основания листа имеются крупные до 1 см, рано опадающие прилистники.

Анализ анатомического строения листовой пластинки дал следующие результаты. Основным путем поступления газообразных выбросов в листья являются устьица. По расположению устьиц листья осины гипостоматические. Среднее число устьиц на единицу площади у *P. tremula* около 180 шт./мм². Размер устьиц составляет 23–24 мкм. Встречаются несколько типов устьичных аппаратов: парацитный, аномоцитный и латероцитный. Устьица расположены на одном уровне с эпидермальными клетками, замыкающие клетки устьиц довольно мелкие. Основные эпидермальные клетки средних размеров (1400–1500 шт./мм² – нижняя эпидерма, 1100–1300 шт./мм² – верхняя). Антиклинальные стенки

извилистые, близкие к измято стеночным [9, 10].

Под воздействием промышленных выбросов наблюдается уменьшение размеров устьиц на 4–6 мкм. Количество устьиц на единицу площади увеличивается, этот показатель достигает 64%. Уменьшаются параметры основных эпидермальных клеток и, соответственно, увеличивается их число на верхней эпидерме на 13–34%, на нижней – на 16–30%. Изменения проявляются в пределах трехкилометровой зоны. На расстоянии 10 км от источника выбросов достоверно увеличивается количество основных клеток эпидермы на адаксиальной стороне листа и незначительно сокращаются параметры устьиц на абаксиальной стороне (табл. 2). Если характеризовать устьичный индекс, то значительное увеличение наблюдается только в непосредственной близости от комбината, с 11,4 в контроле до 15,3 на 1 П.П.

Кроме устьиц на эпидерме располагаются основания трихом, очень часто они нарушают таблитчатый рисунок эпидермы, особенно при густом опушении. Основания трихом и само опушение явно выражено на нижней стороне листовой пластинки. В зоне загрязнения наблюдается тенденция к увеличению густоты опушения. Однако, отмечается большая вариабельность этого признака у разных особей одного вида. Трихомы представлены простыми одноклеточными волосками, длина которых колеблется от 130 до 460 мкм. Листья во взрослом состоянии чаще всего трихом не имеют, но основания от этих структур остаются хорошо заметны.

Таблица 2. Параметры эпидермы *Populus tremula*

№ПП	Количество устьиц на нижней эпидерме, шт./мм ²	Длина устьиц нижней эпидермы, мкм	Количество эпидермальных клеток верхней эпидермы шт./мм ²	Количество эпидермальных клеток нижней эпидермы шт./мм ²	Устьичный индекс
1	295,5±3,36***	20,8±0,24***	1477±15,0***	1632±11,0***	15,3
2	209,2±2,88***	20,2±0,32***	1526±19,2***	1627±14,3***	11,4
3	195,0±4,94*	23,1±0,21**	1295±11,4***	1529±12,8***	11,3
4	187,0±4,25	23,2±0,23**	1293±12,1***	1429±11,2	11,6
5	180,0±3,26	24,1±0,22	1100±12,4	1406±11,4	11,4

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

Эпидерма характеризуется наличием кутикулярных складок. Они могут располагаться на замыкающих и побочных клетках нижней эпидермы. В определенной степени наблюдается защитная роль складок в противостоянии закрыванию устьиц при

потере растением тургора. Количество кутикулярных складок от 3 до 17, расходятся они перпендикулярно устьичной щели, у части клеток складки около устьиц отсутствуют [9, 11]. У сильно угнетенных особей нередко наблюдается разрушение кутикулы под действием поллютантов, что выражается в потере эпидермой соответствующего “рисунка”. Наиболее четко складки проявляются при обезвоживании листьев и потере тургора, когда они выполняют роль ребер жесткости.

Надо отметить, что, как и у большинства видов в условиях загрязнения листья осины характеризуются мелкоклеточностью: уменьшаются размеры устьиц и основных эпидермальных клеток и, соответственно, увеличивается их число на единицу площади. Изменение в процентном содержании устьиц на единицу площади наглядно показывает устьичный индекс.

P. tremula характеризуются билатеральной листовой пластинкой с рыхло сложенным мезофиллом, без гиподермы. Листовая пластинка тонкая 159 мкм в контроле. Мезофилл умеренно слойный с переходом к многослойности, состоит из 2 слоев столбчатых и 4–5 слоев губчатых клеток [12].

На загрязненных участках толщина листовой пластинки уменьшается на 25%. Уменьшение толщины листовой пластинки происходит за счет сокращения протяженности губчатого мезофилла. Протяженность палисадной паренхимы уменьшается только на пробной площади в непосредственной близости от комбината, тогда как на расстоянии 1-3 км от источника выбросов, напротив протяженность ткани увеличивается с 72 мкм до 82 мкм. *P. tremula* обладает тонкой эпидермой 11 мкм верхняя, 8 мкм нижняя эпидерма, в зоне загрязнения ее толщина увеличивается на 1-3 мкм. Причем, значительное утолщение показывает наружная клеточная стенка эпидермы с кутикулой. Максимальная толщина кутикулы и клеточной стенки наблюдается на 2 и 3 П.П.

Если оценивать процентное содержание тканей, то соотношение будет иметь следующий вид. Под воздействием поллютантов увеличивается доля покровных тканей и столбчатого мезофилла и уменьшается губчатого, увеличивается коэффициент палисадности. *P. tremula* чувствует себя угнетенно на первых трех П.П. В зоне сильного загрязнения листовая пластинка характеризуется самой незначительной долей столбчатого мезофилла и большой губчатого, следовательно, низким коэффициентом палисадности (вероятно особи находятся в угнетенном состоянии). На расстоянии 1-3 км значительно

возрастает протяженность столбчатого мезофилла и уменьшается губчатого, коэффициент палисадности увеличивается на 10%. На расстоянии десять км достоверных отличий не отмечено (табл. 3).

Таблица 3. Протяженность тканей листовой пластинки *Populus tremula*

№ ПП	Толщина верхней эпидермы, мкм	Толщина нижней эпидермы, мкм	Толщина столбчатого мезофилла, мкм	Толщина губчатого мезофилла, мкм	Толщина листовой пластинки, мкм
1	13,9±0,18***	9,3±0,16***	53,2±0,84***	45,0±0,77***	121,4±1,29***
2	13,4±0,15***	10,1±0,16***	82,3±1,05**	53,1±0,69***	148,8±1,14***
3	11,7±0,18*	9,7±0,19***	82,4±1,40**	46,5±0,79***	150,3±1,45***
4	11,2±0,14	8,4±0,13	78,1±1,20	62,3±0,73	160,0±1,22
5	11,1±0,18	8,3±0,16	77,2±1,01	62,8±0,83	159,4±0,93

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

Согласно изменению толщины листа, происходит уменьшение толщины мезофилла и покровных тканей. Под действием токсикантов наблюдаются изменения в упаковке столбчатых клеток, увеличивается отношение высоты клетки к ее ширине. Значительно изменяется коэффициент прозенхимности в неблагоприятных условиях, так высота превосходит ширину клетки в 7 раз, тогда как в контроле – в 5 раз (табл. 4).

Таблица 4. Характеристика клеток столбчатого мезофилла *Populus tremula*

№ ПП	Высота клеток столбчатого мезофилла (h), мкм		Ширина клеток столбчатого мезофилла (d), мкм		Коэффициент прозенхимности h/d	
	I слой	II слой	I слой	II слой	I слой	II слой
1	35,8±0,22***	20,3±0,02***	5,1±0,12***	4,0±0,25***	7,0	5,1
2	50,8±0,51***	34,9±0,48***	7,4±0,13***	7,1±0,10	6,9	4,9
3	58,0±0,63***	35,2±0,38***	10,6±0,16***	8,9±0,18***	5,5	4,0
4	44,4±0,22	26,2±0,22***	8,9±0,13	7,5±0,20*	5,0	3,5
5	45,2±0,25	22,2±0,32	9,0±0,21	6,9±0,20	5,0	3,2

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

Исследование вентилируемости мезофилла с помощью точечного интеграционного окуляра показало увеличением объема межклетников под воздействием поллютантов, особенно на 1 П.П. и 2 П.П.

Заключение

Под воздействием промышленных токсикантов у *P. tremula* L. наблюдается

Дрожжина В.Н., Дрожжин О.С.

Воздействие промышленных токсикантов на структуру листьев *Populus tremula* L. (Salicaceae)**Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»**

уменьшение линейных размеров листовых пластинок, отмечено уменьшение годового прироста, что влечет за собой уменьшение ассимиляционной поверхности побега, а, следовательно, снижается продуктивность процесса фотосинтеза. Использовать показатель облиственности побега следует в сочетании с показателями линейных параметров листьев, так как возможно увеличение показателей облиственности побега в непосредственной близости от источника загрязнения при одновременном сокращении показателей длины и ширины листовой пластинки. Площадь поврежденности листовых пластинок некрозами в пределах трехкилометровой зоны достигает 60%.

Показатели эпидермы листовой пластинки изменяются в сторону уменьшения линейных размеров структурных элементов при увеличении их количества, т.е. наблюдается ксероморфизм в анатомическом строении в условиях стресса. Наиболее показательным является устьичный индекс, его значение в зоне загрязнения увеличивается. Наблюдается изменение кутикулярного рисунка, однако достоверно оценить изменчивость признака не удалось.

Под действием токсикантов уменьшается общая толщина листовой пластинки, происходит это за счет изменения протяженности хлорофиллоносных тканей. Оценка процентного содержания тканей дает более объективную оценку. Значительно не изменяется содержание покровных тканей, перестройки затрагивают хлорофиллоносные ткани – увеличивается объем столбчатого и уменьшается объем губчатого мезофилла. Коэффициенты палисадности и прозенхимности в ответ на воздействие выбросов возрастают. Можно отметить, что для особей в непосредственной близости от комбината характерно значительное угнетение, что проявляется в увеличении объема межклетников, а коэффициент палисадности уменьшается по сравнению с контролем.

Достоверные изменения показателей отмечены в пределах трехкилометровой зоны, на расстоянии 10 км от источника выбросов достоверных отличий в исследуемых показателях не обнаружено.

Список использованных источников

1. Клевцова М.А., Михеев А.А. Изменение морфометрических параметров листовых пластинок *Populus italica* (Du Roi) Moench под влиянием эмиссии загрязняющих веществ промышленных предприятий // Региональные геосистемы. – 2021. – Т. 45. – № 4. – С. 558–575.

2. Кобланова С.А., Бакытбек кызы А. Фитомониторинг состояния рекреационных зон г. Костаная методом флуктуирующей асимметрии на примере тополя бальзамического (*Populus balsamifera*) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2019. – № 18. – С. 508–510.
3. Дрожжина В.Н. Изменение формы листовой пластинки *Populus tremula* L. в условиях промышленного загрязнения // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Вятка, 05–08 декабря 2016 года. Том Книга 2. – Вятка: Общество с ограниченной ответственностью "Радуга–ПРЕСС", 2016. – С. 145–147.
4. Кузнецова А.С., Сотникова Е.В. Биоиндикационные показатели стабильности развития листовой пластинки *Populus tremula* в условиях воздействия транспортных потоков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2016. – № 3. – С. 45–51.
5. Скрипальщикова Л.Н., Стасова В.В. Биоиндикационные показатели стабильности развития насаждений в нарушенных ландшафтах // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 2. – С. 62–72.
6. Фурст Г.Г. Методы анатомо-гистохимического исследования растительных тканей. – М.: Наука, 1979. – 155 с.
7. Рудич Д.С. Эпидермальный анализ частиц листьев в судебно-биологической экспертизе. Методическое пособие для судебных экспертов. – Киев, 1981. – 180 с.
8. Макарова М.А. Осиновые (*Populus tremula*) леса Северо-Западного Приладожья // Ботанический журнал. – 2020. – Т. 105. – № 10. – С. 957–980.
9. Молганова Н.А., Овеснов С.А. Особенности микроморфологии и анатомии листа *Populus tremula* L. (sect. *Populus*) и *P. nigra* L. (sect. *Aigeiros* Duby, *Salicaceae*) // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2022. – № 2. – С. 93–100.
10. Анели Н.А. Атлас эпидермы листа. – Тбилиси: Мецниереба, 1975. – 112 с.
11. Паутов А.А., Сапач Ю.О., Иванова О.В., Крылова Е.Г. Микрорельеф поверхности листьев цветковых растений: устьичные кольца и выступы // Ботанический журнал. – 2014. – Т. 99. – № 6. – С. 625–640.
12. Молганова Н.А., Овеснов С.А. Анатомическое строение проводящей системы листа *Populus tremula* (*Salicaceae*) // Ботанический журнал. – 2023. – Т. 108. – № 8. – С. 729–737.

Цитирование:

Дрожжина В.Н., Дрожжин О.С. Воздействие промышленных токсикантов на структуру листьев *Populus tremula* L. (*Salicaceae*) [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st_212.pdf DOI: <https://doi.org/10.51419/202152212>.