

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОСИНТЕЗА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Т.А. Михайлова¹, О.В. Калугина¹, О.В. Шергина¹, Л.В. Афанасьева²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, mikh@sifibr.irk.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия, afanl@mail.ru

Аннотация. Исследовали фотосинтез хвои сосны на территории Южного Предбайкалья в условиях воздействия антропогенных факторов. Показано, что аэротехногенное загрязнение оказывает значительный негативный эффект на первичные процессы фотосинтеза, то есть на осуществление фотохимических реакций. Воздействие почвенной рекреационной нагрузки на фотосинтез косвенное – через создание неблагоприятных эдафических условий произрастания деревьев.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, фотосинтез, аэротехногенное загрязнение, рекреационная нагрузка

DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1094-1098

Проведены исследования структурных и функциональных показателей фотосинтеза хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Южного Предбайкалья в условиях воздействия антропогенных факторов – техногенного загрязнения и рекреационной нагрузки. Полевые исследования проводили в сосняках разнотравных путем закладки пробных площадей (ПП) с использованием отечественных и зарубежных методик [Методы ..., 2002; Manual ..., 2010]. Обследовались древостои сосны, подвергающиеся воздействию техногенных эмиссий промышленных центров Иркутской области (ПП 1-5), а также древостои, испытывающие рекреационную нагрузку на почвенный покров в пределах Прибайкальского национального парка (ПП 6-9). Фоновыми служили ПП 10 и 11, не подпадающие под основной перенос аэровыбросов и характеризующиеся минимальной рекреационной нагрузкой. Уровень загрязнения древостоев на ПП 1-5 оценивался по содержанию в хвое элементов-поллютантов (табл. 1). На ПП 1, расположенной в окрестностях крупного транспортного узла, в хвое сосны высоко содержание практически всех поллютантов, за исключением цинка; на ПП 2, находящейся вблизи алюминиевого завода, особенно значимо загрязнение фторидами, аэрозолями

Таблица 1.

Концентрации химических элементов (мг/кг от сухой массы) в хвое сосны на техногенно загрязняемых ПП

Элемент	Пробные площади (ПП)					
	Фоновые ПП	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 4	ПП 5
F	10,2±1,6	37,5±2,7	85,1±10,4	28,1±0,8	26,2±1,8	20,8±1,3
S	252±18	612±33	572±62	693±42	511±52	581±23
Al	125±10	454±62	695±115	238±46	182±34	439±41
Fe	86±12	588±111	188±22	353±70	323±45	441±21
Zn	40,5±2,3	41,3±1,1	48,3±2,9	47,4±0,9	59,3±4,9	39,9±0,9
Pb	0,15±0,02	0,85±0,05	0,22±0,01	0,76±0,01	0,66±0,02	0,72±0,01
Cd, ×10 ⁻²	1,60±0,11	4,54±0,43	4,91±0,94	1,65±0,33	1,14±0,16	2,44±0,10
Hg, ×10 ⁻²	0,52±0,10	1,13±0,12	0,73±0,14	0,91±0,13	9,11±0,40	0,50±0,17

алюминия; вблизи ТЭЦ (ПП 3) в хвое выявляется высокий уровень серы; в окрестностях крупного химического предприятия (ПП 4) в хвое резко возрастает накопление ртути; вблизи угледобывающего центра (ПП 5) в хвое также повышено содержание многих элементов-поллютантов. Основным негативным фактором, влияющим на состояние древостоев сосны, произрастающих в рекреационных зонах (ПП 6-9), является значительная нарушенность почвенного покрова, особенно верхних горизонтов Ad и A (табл. 2). Их плотность увеличивается в среднем на 60-80%, в то же время снижаются другие физические параметры – влажность, пористость и аэрация, соответственно, на 45, 35 и 70%. Наибольшие нарушения почвы выявляются на ПП 6, расположенной на о. Ольхон вблизи пос. Хужир. Кроме того, на этих ПП регистрируются изменения в составе ППК, в частности, уменьшение обменных форм калия и магния, а также снижение буферности на 40-50% в сравнении с фоновой почвой.

Таблица 2.

Физические параметры верхних горизонтов серых лесных почв при высокой рекреационной нагрузке

Параметры	Пробные площади				
	Фоновые ПП	ПП 6	ПП 7	ПП 8	ПП 9
Плотность сложения горизонта Ad, г/см ³	0,71	1,15	1,20	1,28	0,96
Плотность твердой фазы горизонта Ad, г/см ³	1,91	2,73	1,96	2,71	2,36
Естественная влажность горизонта Ad, %	48,90	28,70	41,20	25,40	28,30
Нарушение органической толщи горизонтов Ad и A, %	5,00	60,00	15,00	55,00	40,00
Пористость горизонта Ad, %	70,30	44,50	68,60	48,20	53,60
Аэрация горизонта Ad, %	48,30	12,50	41,50	15,80	44,60

Негативное влияние обоих факторов на фотосинтез сосны оценивалось по изменению комплекса репрезентативных параметров: содержания хлорофиллов и каротиноидов в хвое, соотношения пигментов, процентного содержания хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК), флуоресценции хлорофилла.

Обнаружено, что в хвое деревьев сосны при воздействии рассматриваемых негативных факторов происходит уменьшение общего фонда пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в сравнении с хвоей деревьев на фоновых ПП. При расчете количества пигментов на массу одной хвоинки в условиях техногенного загрязнения выявлена тенденция к снижению уровня хлорофилла *a* максимально на 18%, хлорофилла *b* – на 38%, каротиноидов – на 40% от фонового, в условиях рекреационной нагрузки максимальное снижение составляло, соответственно, 16, 32 и 36%. При расчете содержания пигментов на массу хвои побега 2-го года жизни отмечается более резкое уменьшение концентрации как хлорофиллов, так и каротиноидов (рисунок). Наибольшее падение уровня пигментов зарегистрировано на техногенно загрязняемых территориях (ПП 1-5), а также на ПП 6, характеризующейся очень высокой рекреационной нагрузкой. Такое уменьшение количества пигментов в расчете на массу хвои побега коррелирует с ухудшением их морфоструктурных параметров, то есть сокращением фотосинтезирующей поверхности за счет снижения длины побегов и числа хвоинок на них, уменьшения массы и длины самих хвоинок. На биохимическом уровне эти изменения в значительной мере обусловлены снижением содержания органического вещества в хвое, о чем можно судить по недостаточному количеству в ней углерода, его уровень в 1,5–2,5 раза ниже фонового. На нарушение стабильной

работы фотосинтетического аппарата указывает также изменение соотношения хлорофиллов и каротиноидов в хвое (табл. 3). По своим функциональным свойствам молекулы пигментов различаются, поэтому для поддержания нормального уровня фотосинтеза и сопряженных энергетических процессов соотношение фотосинтетических пигментов должно быть стабильным. При расчете этого соотношения на массу одной хвоинки показано, что в фоновых условиях оно равно 4,1, в то время как при высокой рекреационной нагрузке увеличивается до 5,6, при техногенном загрязнении – до 5,8. Происходит это преимущественно за счет снижения количества каротиноидов. Кроме того, на всех ПП, подвергающихся антропогенному воздействию, отмечается увеличение соотношения хлорофиллов, что в основном обусловлено падением уровня хлорофилла *b*.

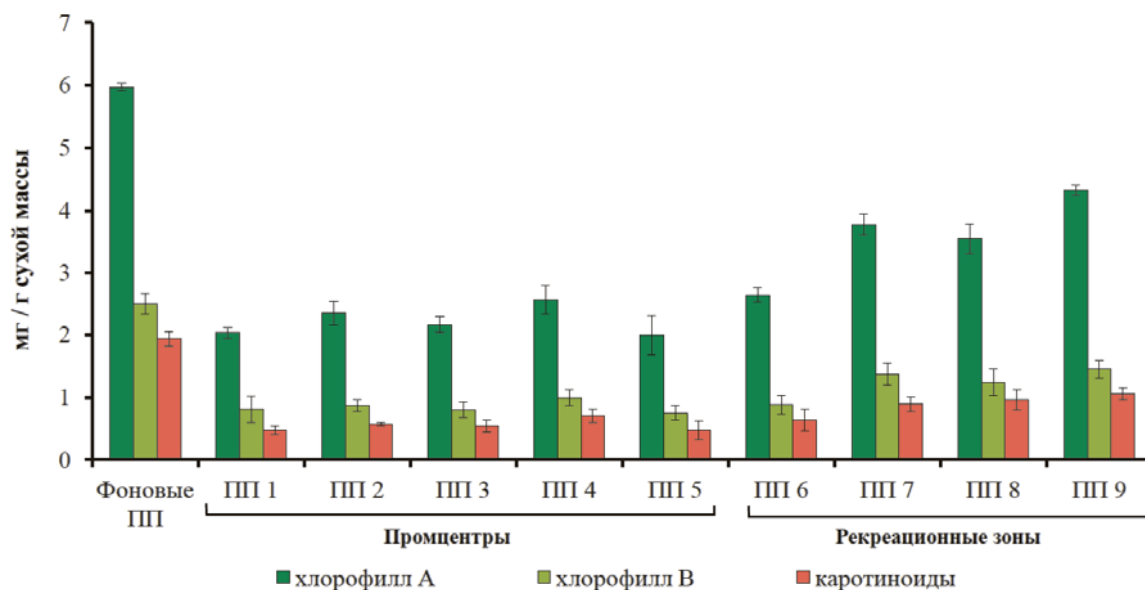


Рис. 1. Содержание пигментов в хвое сосны вблизи промцентров и в рекреационных зонах в расчете на массу хвои одного побега второго года жизни.

Таблица 3.

Соотношение пигментов в хвое сосны в условиях техногенного загрязнения и рекреационной нагрузки

Пробные площади	Соотношение пигментов		Содержание хлорофиллов в ССК, %
	$\frac{\Sigma(\text{хл. } a + \text{хл. } b)}{\text{каротиноиды}}$	$\frac{\text{хл. } a}{\text{хл. } b}$	
Фоновые ПП	4,1	2,3	66,1
Промышленные центры			
ПП 1	5,8	3,1	53,5
ПП 2	5,1	3,1	55,1
ПП 3	5,2	2,8	57,6
ПП 4	5,0	3,0	55,1
ПП 5	5,5	2,7	59,8
Рекреационные зоны			
ПП 6	5,6	3,0	55,00
ПП 7	5,3	2,8	58,26
ПП 8	4,8	2,8	57,89
ПП 9	5,3	3,0	55,00

Расчет процентного содержания хлорофиллов в ССК от общего фонда зеленых пигментов хвои выявил снижение этого показателя, максимально на 20% (см. табл. 3). Эти результаты свидетельствуют о снижении светопоглощающих свойств фотосинтетического аппарата, поскольку основная функция пигментов ССК состоит в поглощении и передаче энергии квантов света в реакционные центры. Снижение пула пигментов в ССК косвенным образом указывает на меньшее расходование поглощаемой энергии на фотохимические процессы, при этом должен снижаться квантовый выход фотосистемы II и увеличиваться интенсивность флуоресценции, что и было обнаружено. В частности, показатель $Y(II)$ в условиях техногенного загрязнения снижался на 19-20%, а эффективность нефотохимического тушения $Y(NPQ)$, то есть квантового выхода энергии, рассеиваемой в виде флуоресценции, возрастала с 0.581 до 0.630 усл. ед. При определении показателя F_v/F_m , характеризующего максимальную эффективность использования энергии света реакционными центрами фотосистемы II, выявлено статистически значимое его изменение – снижение в хвое деревьев в условиях техногенного загрязнения (0.802 усл. ед.) в сравнении с фоновым значением (0.810 усл. ед.). Считается, что сниженные значения F_v/F_m наблюдаются в условиях стресса и указывают на уменьшение активности реакционных центров фотосистемы II и угнетение процесса фотосинтеза [Maxwell, Johnson, 2000]. В условиях рекреационной нагрузки квантовый выход фотосистемы II снижался на 12-15%, а величина нефотохимического тушения возрастала на 10-11%. Отсюда следует, что больший негативный эффект на первичные процессы фотосинтеза, то есть на осуществление фотохимических реакций, оказывает техногенное загрязнение.

В целом полученные данные свидетельствуют, что оба фактора значимо нарушают фотосинтез сосны, что приводит к подавлению ростовых процессов деревьев и в конечном итоге к снижению их продуктивности [Михайлова и др., 2017]. При аэротехногенном загрязнении поллютанты действуют на фотосинтетический аппарат напрямую, то есть нарушение начинается с первичных процессов фотосинтеза (световой фазы). Поскольку многие токсиканты обладают свойствами сильных окислителей – свободных радикалов, они могут вызвать появление автокаталитических цепных реакций свободнорадикального и фотодинамического окисления, что в свою очередь, может привести к окислительному повреждению мембраны [Николаевский, 2002; Рубин, Кренделева, 2003]. Снижение уровня пигментов и изменение их соотношений может происходить из-за их разрушения и/или подавления синтеза. Воздействие почвенной рекреационной нагрузки на фотосинтез косвенное – через создание неблагоприятных эдафических условий произрастания деревьев, что вызывает нарушение режима их питания и водообмена, вследствие разбалансировки метаболизма происходит подавление синтеза многих органических веществ, в том числе пигментов.

Литература

Методы изучения лесных сообществ. Санкт-Петербург: Научно-исследовательский институт химии Санкт-Петербургского ун-та, 2002. – 240 с.

Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Динамика состояния сосновых лесов Предбайкалья в условиях воздействия антропогенных факторов // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 1. – С. 44–55.

Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. Пушкино: ВНИИЛМ, 2002. – 220 с.

Рубин А.Б., Кренделева Т.Е. Регуляция первичных процессов фотосинтеза // Успехи биологической химии. – 2003. – Т. 43. – С. 225–266.

Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests // UNECE, ICP Forests Programme Coordinating Centre. – Hamburg, 2010. – 477 p.

Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // Journal Experim. Bot. – 2000. – 51. – P. 659–668.

ALTERATION OF PHOTOSYNTHESIS PARAMETERS IN SCOTS PINE UNDER ANTHROPOGENIC INFLUENCE

T.A. Mikhailova¹, O.V. Kalugina¹, O.V. Shergina¹, L.V. Afanasieva²

¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, *mikh@sifibr.irk.ru*

²Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the RAS, Ulan-Ude, Russia, *afanl@mail.ru*

Abstract. The study was carried out in the Southern Prebaikalia region (Russia) in the territories effected by anthropogenic factors – aerotechnogenic pollution and recreational load on the soil cover. It was shown that both factors significantly impair the pine needle photosynthesis. Pronounced negative effect on the primary photosynthesis processes, that is on the proceeding photochemical reactions, was found under aerotechnogenic pollution. The effect of soil recreational load on photosynthesis was indirect – through the creation of unfavorable edaphic conditions for the trees growth.

Keywords: *scots pine, photosynthesis, aerotechnogenic pollution, soil recreational load*