

РАЗЛИЧИЯ В АККЛИМАЦИОННЫХ СТРАТЕГИЯХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ И ЕЛИ СИБИРСКОЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Н.В. Пахарькова, О.П. Калякина, А.А. Шубин, Ю.С. Григорьев,
С.В. Пахарьков, Г.А. Сорокина

Сибирский федеральный университет
660041 Красноярск, пр. Свободный, 79; e-mail: nina_pakharkova@yandex.ru

Результаты проведенного комплексного исследования позволили сделать предположение о различных акклимационных стратегиях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на загрязнение воздушной среды. Для определения уровня загрязнения окружающей среды проводили анализ поверхностного и внутри-тканевого загрязнения хвои методами ионной хроматографии и рентгенофлуоресцентной спектроскопии. С увеличением концентрации загрязняющих веществ в хвое старших возрастов, у ели сибирской основная фотосинтетическая нагрузка ложится на однолетнюю хвою, и тогда соотношение количества фотосинтетических пигментов и показателей фотосинтетической активности хвои разных возрастов существенно отличается у растений, произрастающих в неодинаковых по уровню загрязнения районах. У сосны обыкновенной подобного эффекта не наблюдается, вероятно, за счет большей дефолиации хвои, обеспечивающей отток токсикантов с некротизированной хвоей.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., *Picea obovata* Ledeb., замедленная флуоресценция, ионная хроматография, рентгенофлуоресцентная спектроскопия

The results of interdisciplinary complex research allowed to suppose that the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and the Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) have different acclimation strategies to air pollution. Needles' surface and intercellular pollution was analyzed by methods of ion-chromatography and XRF spectroscopy to define the level of environmental pollution. The research shows that photosynthetic pigments quantity and photosynthetic activity of uneven-aged needles differ for plants growing in areas with different levels of pollution. Two-year-old needles of Siberian spruce trees proved to have larger concentration of pollutants therefore one-year-old needles bear the main photosynthetic pressure. This effect is not confirmed for the Scots pine presumably due to more intensive needles defoliation, providing the outflow of toxicants with necrotizing needles.

Key words: *Pinus sylvestris* L., *Picea obovata* Ledeb., delayed fluorescence, ion-chromatography, XRF spectroscopy

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное загрязнение воздушной среды приводит к значительным негативным изменениям в лесных экосистемах, особенно это проявляется в лесах, полностью или частично образованных различными видами хвойных.

Хвойные насаждения занимают более 77,4 % лесопокрытых площадей Красноярского края (Государственный доклад..., 2007). Вредное воздействие загрязненного воздуха на растения происходит как в результате прямого действия газов на ассимиляционный аппарат, так и косвенного влияния через почву. Однако ассимиляционные органы первыми и в большей степени повреждаются токсическими веществами, содержащимися в воздухе промышленных районов и крупных городов, что связано с их интенсивным газообменом. Повышенная чувствительность хвойных связана с длительными сроками жизни хвои, приводящим к большему поглощению токсикантов, слабым развитием запасных тканей и, соответственно, недостаточным накоплением резервных веществ, ограниченной регенеративной способностью. Однако разные виды хвойных обладают различной устойчивостью к загрязнению воздуха (Ayodele, Ahmed, 2001; Yilmaz, Zengin, 2004; Сазонова, Колосова, 2007).

Особенно опасны для хвойных кислые газы, которые, проникая внутрь хвоинок через устьица, вызывают гибель клеток и тканей. Вследствие таких повреждений хвоя деревьев, произрастающей в

загрязнённых районах, отличается малой продолжительностью жизни, и чем более район подвержен действию токсикантов, тем короче жизнь хвои. В связи с этим можно предположить, что соотношение количества хлорофиллов и показателей фотосинтетической активности хвои разных возрастов будет существенно отличаться у растений, произрастающих в неодинаковых по уровню загрязнения условиях.

Для определения влияния загрязнения окружающей среды на жизнедеятельность растения необходимо привлечение целого комплекса методов исследований. Оценка внутритканевого накопления токсикантов может проводиться посредством элементного анализа состава растительного материала. Для этого широко используются методы атомно-абсорбционного, атомно-эмиссионного и масс-спектрометрического анализа (Aroga, Bajwa, 2009). Возможно применение и других методов, в частности хроматографических и рентгено-спектрометрических методов анализа (Pullman, Buchanan, 2006; Tsutsumimoto Tsuji, 2007).

Цель данной работы – изучение влияния техногенного загрязнения воздушной среды на фотосинтетический аппарат хвои различного возраста у сосны обыкновенной и ели сибирской.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований использова-

лись побеги отдельно стоящих деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) 30-40 лет.

Исследования проводились в 2007-2009 г.г. на территории г. Красноярска и его окрестностей. В качестве контроля была взята пробная площадь (ПП1), расположенная за чертой города Красноярска с западной (наветренной) стороны, не подверженная действию техногенного загрязнения, а опытная пробная площадь (ПП2) расположена в индустриальном районе города Красноярска (ул. Рокоссовского, Советский район), подвержена загрязнению воздуха промышленными предприятиями (КраЗ и др.) и автомобильным транспортом (Лопатин, Лесных, Шеховцова, 1993). Все измерения проводились отдельно для однолетней, двухлетней и трехлетней хвои, взятой из средней части кроны.

Для оценки накопления продуктов, образованных в результате загрязнения воздушной среды кислыми газами, проводили анализ смывов неорганических соединений бидистиллированной водой с поверхности хвои исследуемых растений. Побеги, для предотвращения потери растворимых соединений, собирали в феврале, до начала таяния снега на ветвях. Смывы проводили с навески хвои 50 г 100 мл бидистиллированной воды в условиях медленного помешивания образцов в течение 15 минут.

Определение неорганических анионов (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) проводили по стандартной методике (ИСО 10304-1-92) в Центре коллективного пользования приборами СФУ «Научно-методические исследования и анализа новых материалов, наноматериалов и минерального сырья» на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence, снабженном хроматографической колонкой Shodex IC SI-90 4E (4×250 мм). Хроматограф обеспечивает пределы обнаружения определяемых соединений на уровне $n \cdot 10^{-3}$ мг/л и диапазон определяемых содержаний 0,1 – 1000 мг/л, позволяет в течение 30 мин определить из одной пробы до 10 ионов. В качестве элюента использовали смесь карбоната и гидрокарбоната натрия (1,8 мМ Na_2CO_3 + 1,7 мМ NaHCO_3).

Элементный полуколичественный анализ хвои выполняли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре с волновой дисперсией ARL Advant`X (лаборатория рентгеноспектральных методов анализа ЦКП СФУ). Количественное содержание элементов в образцах оценивали на основании метода фундаментальных параметров с использованием программного обеспечения UniQuant-5. Для анализа высушенную и измельченную хвою прессовали в таблетки. В качестве связующего материала использована борная кислота,

которая добавлялась к образцу в контролируемом соотношении.

Состояние растений определяли по изменению морфологических параметров побегов деревьев, количеству хлорофиллов а и b, показателям замедленной флуоресценции хлорофилла хвои и глубине зимнего покоя через регистрацию термоиндуцированных изменений нулевого уровня флуоресценции (ТИНУФ) в диапазоне от 20 до 80 °С при средней скорости нагрева 5 градусов в минуту (Гаевский и др., 1987).

Морфометрический анализ проводили по следующим показателям: линейный прирост побега, число хвои на 1 см побега, длина хвои, % хвои с некрозами и хлорозами.

Количественно фотосинтетические пигменты (хлорофилл а и b) определяли с помощью однолучевого спектрофотометра СФ-46 после экстракции в 80 % ацетоне, в пересчете на сухой вес (Vernon, 1960).

Параметры замедленной флуоресценции определяли на флуориметре «Фотон-10». В качестве относительного показателя замедленной флуоресценции (ОП ЗФ) было взято отношение значений интенсивности быстрой и медленной компонент затухания свечения, измеряемых на свету высокой (120 Вт/м²) и низкой (10 Вт/м²) интенсивности, соответственно (Григорьев, Фуряев, Андреев, 1996.)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Так как эволюция растительности совершалась в условиях достаточно чистого атмосферного воздуха, современные виды растений, в том числе и хвойные, не обладают специфической приспособленностью к действию токсичных газов. Однако существуют ответные реакции (акклимации), позволяющие растениям приспосабливаться к новым стрессовым условиям и выжить в условиях загрязнения воздушной среды. Эти реакции, по видимому, могут отличаться у разных видов хвойных.

Сосна и ель очень чувствительны к загрязнению воздуха газами. Особенно опасны для них кислые газы, в том числе соединения серы, преобладающие среди воздушных токсикантов во многих индустриальных районах. Вследствие повреждений кислыми газами хвоя деревьев, произрастающих в загрязненных районах, отличается меньшей продолжительностью жизни. Так, если в естественных условиях возраст хвои сосны может достигать 5-6 лет, то в загрязненных районах он ограничен 2-3 годами. У ели в индустриальных районах возраст хвои составляет 3-4 года вместо 6-7 лет.

Таблица 1 - Содержание анионов в смывах с поверхности хвои (n=2; P=0,95)

Место отбора (вид хвойных деревьев)	С±ΔС, мг/кг			
	Cl^-	PO_4^{3-}	NO_3^-	SO_4^{2-}
ПП1 (сосна обыкновенная)	2,9±0,4	н/о	28,0±4,0	33,0±6,0
ПП1 (ель сибирская)	13,0±2,0	3,2±0,5	30,0±5,0	27,0±4,0
ПП2 (сосна обыкновенная)	22,0±3,0	н/о	54,0±8,0	270,0±40,0
ПП2 (ель сибирская)	92,0±14,0	5,5±0,8	84,0±12,0	530,0±80,0

Анализ содержания элементов в тканях хвои (табл. 2) показал, что количество магния, кремния, фтора, алюминия, железа в хвое из загрязненного района (ПП2) выше, чем в контроле (ПП1). Вероятно, такая ситуация связана прежде всего с выбросами Красноярского алюминиевого завода и предприятий теплоэнергетики. Вместе с тем, повышение уровня магния в хвое с ПП2 может быть вызвано увеличением содержания хлорофилла в хвое, что является приспособительной реакцией деревьев на повреждение хвои и частичную дефолиацию. Из представленных данных также видно, что у сосны содержание магния повышено в хвое всех трех возрастных групп, причем в хвое второго года несколько больше. У ели же содержание магния на ПП2 в хвое текущего года в 1,4 и 1,3 раза превышает содержание этого элемента в хвое второго и третьего года. На контрольной пробной площади (ПП1) количество магния в хвое незначительно уменьшается от первого к третьему году, причем у сосны эти различия более заметны. Причиной снижения содержания серы и фосфора в хвое ели в условиях загрязнения может стать нарушение белкового и энергетического обмена. Кроме того, повышение уровня кальция и снижение содержания фосфора, характерное для старых листьев (Леопольд, 1968), свидетельствует о более быстром старении хвои ели в загрязненных районах. Как видно из таблицы 1, содержание кальция в хвое ели текущего года на ПП2 в 1,75 раза меньше, чем в хвое второго и третьего годов, тогда как на ПП1 различие значительно меньше – 1,13. По фосфору наблюдается противоположная картина, его содержа-

ние в молодой хвое на ПП2 в 2 раза выше, чем в хвое старших возрастов, на ПП1 различия минимальны. У сосны подобный эффект наблюдается в значительно меньшей степени.

Известно, что одним из механизмов дезактивации токсичных соединений в растениях является «складирование» (хлорозы и некрозы) и «перекачка» в более старую хвою с последующей дефолиацией.

В связи с этим можно сделать предположение, что с увеличением концентрации загрязняющих веществ в хвое старших возрастов и ее отмиранием, основная фотосинтетическая нагрузка ложится на «молодую» хвою, и тогда соотношение количества фотосинтетических пигментов и показателей фотосинтетической активности хвои разных возрастов будет существенно отличаться у растений, произрастающих в неодинаковых по уровню загрязнения районах.

Немаловажное значение при исследовании состояния растительности имеет изучение пластичности фотосинтетического аппарата, его способности приспосабливаться к изменяющимся внешним условиям. Одним из информативных и наиболее распространенных параметров, характеризующих фотосинтетический аппарат, является его пигментный состав.

На рисунке 1 представлены данные о содержании хлорофилла в хвое сосны обыкновенной и ели сибирской в зависимости от района произрастания. Нужно отметить, что количество хлорофиллов в исследуемой хвое у ели выше, чем у сосны, причем как в летнее, так и в зимнее время.

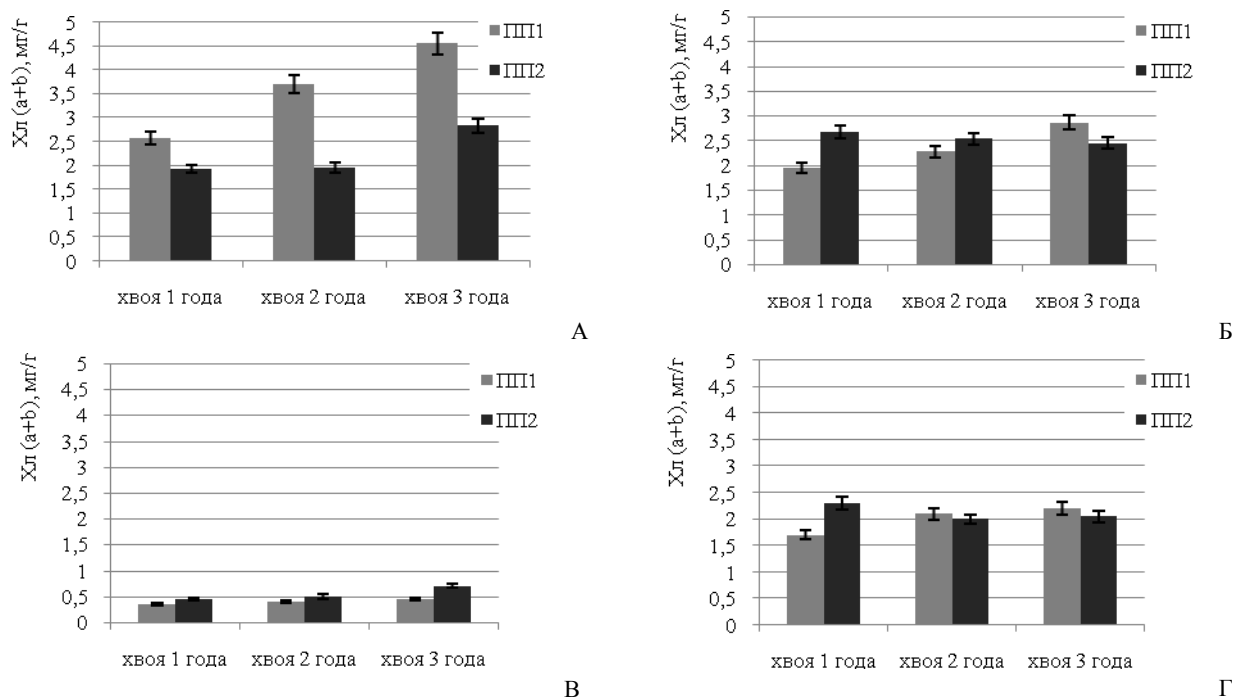


Рисунок 1 - Сумма хлорофиллов *a* и *b* в хвое сосны обыкновенной (А – август, В – январь) и ели сибирской (Б – август, Г – январь)

Таблица 2 - Содержание элементов (%) в хвое ели сибирской и сосны обыкновенной

Элемент	Возраст хвои	Ель сибирская		Сосна обыкновенная	
		ПП1	ПП2	ПП1	ПП2
K	1 год	35,36±0,24	35,19±0,24	25,81±0,21	30,34±0,23
	2 года	25,54±0,22	22,90±0,21	27,44±0,22	22,71±0,21
	3 года	27,15±0,22	16,66±0,19	21,72±0,19	21,40±0,20
Ca	1 год	40,50±0,24	31,10±0,23	41,97±0,24	30,86±0,22
	2 года	46,34±0,25	53,31±0,25	43,60±0,25	35,79±0,24
	3 года	45,85±0,25	54,01±0,25	48,08±0,25	35,60±0,25
P	1 год	6,88±0,13	8,73±0,14	7,58±0,11	7,98±0,12
	2 года	7,29±0,13	4,43±0,10	6,88±0,13	7,13±0,13
	3 года	6,62±0,12	4,42±0,10	6,88±0,14	5,60±0,11
Si	1 год	2,55±0,08	4,86±0,11	1,77±0,06	7,21±0,14
	2 года	3,20±0,09	5,98±0,12	1,79±0,07	10,10±0,15
	3 года	3,57±0,09	8,69±0,14	1,91±0,04	10,30±0,13
Mg	1 год	2,64±0,08	4,34±0,10	3,35±0,08	4,13±0,09
	2 года	2,43±0,08	3,06±0,09	3,24±0,09	4,49±0,10
	3 года	2,42±0,08	3,36±0,09	2,58±0,05	3,99±0,08
S	1 год	4,25±0,10	3,73±0,09	6,55±0,11	5,88±0,11
	2 года	4,43±0,10	2,94±0,08	5,71±0,12	5,64±0,11
	3 года	4,22±0,10	3,16±0,09	5,99±0,10	5,95±0,12
Al	1 год	1,17±0,05	1,83±0,07	2,54±0,06	3,25±0,09
	2 года	1,27±0,06	1,79±0,07	3,32±0,90	4,16±0,10
	3 года	1,80±0,07	2,10±0,07	2,05±0,04	4,38±0,12
Fe	1 год	0,77±0,04	1,68±0,06	2,34±0,05	3,59±0,10
	2 года	1,03±0,05	1,95±0,07	1,64±0,06	5,05±0,11
	3 года	1,25±0,06	2,48±0,08	2,75±0,07	4,58±0,13
F	1 год	1,14±0,14	3,60±0,89	н/о	0,81±0,49
	2 года	1,36±0,24	2,39±1,22	н/о	0,61±0,33
	3 года	2,56±1,01	3,10±1,26	1,74±0,76	3,00±1,45

У сосны в летнее время в хвое с контрольной пробной площади содержание пигментов выше, чем из загрязненного района, а у ели общее количество пигментов примерно одинаково, но наблюдается перераспределение пигментов в сторону молодой хвои. Следует также указать, что в загрязненном районе концентрация хлорофиллов в хвое ели первого, второго и третьего года жизни близка по величине, тогда как контроле она увеличивается с возрастом хвои. Как видно из рисунка 2, к третьему году количество пигментов в хвое с контрольной площади превышает этот показатель для загрязненного района. Считается, что у ели наиболее активно фотосинтезирующей является хвоя в возрасте трех-четырёх лет. Следовательно, можно утверждать, что на загрязненной площадке у ели хвоя первых двух лет также «работает в полную силу», помогая хвое старшего возраста. У сосны, как более устойчивого к загрязнению вида, подобного эффекта не наблюдается. В зимний период у обоих видов, особенно у сосны, отмечается более низкое содержание хлорофиллов, что согласуется данными других авторов (Vogg et al, 1998; Софронова, Чепалов, 2007). У ели сибирской в зимнее время также сохраняется перераспределение содержания хлорофиллов в сторону хвои младшего возраста, и в целом хвоя из загрязненного района содержит большее количество пигментов.

У сосны обыкновенной общее количество хлорофиллов в хвое из загрязненного района в зимнее время также выше, чем в контроле, что может быть связано как с частичным повреждением

хвои в виде хлорозов и некрозов, так и с неполным переходом в состояние зимнего покоя деревьев, произрастающих в загрязненном районе (Григорьев, Пахарькова, 2001).

Подтверждением последнего предположения может служить скорость выхода побегов из состояния зимнего покоя в лабораторных условиях. Накопление элементов загрязнения в хвое могут вызывать нарушения работы фотосинтетического аппарата и изменить многие эволюционно сложившиеся комплексы приспособительных реакций растения к условиям существования. Одним из возможных проявлений такого воздействия может быть нарушение естественной динамики перехода древесных растений в состояние покоя и выхода из него (Григорьев, Пахарькова, 2001). Для оценки глубины зимнего покоя и динамики выхода из этого состояния хорошо зарекомендовал себя метод регистрации термоиндуцированных изменений нулевого уровня флуоресценции (ТИНУФ). Регистрация ТИНУФ хвои проводилась на флуориметре «Фотон-5» в диапазоне от 20 до 80 °C. В качестве показателя глубины зимнего покоя взят коэффициент R_2 , являющийся отношением амплитуд низкотемпературного (около 50 °C) и высокотемпературного (около 70°C) пиков нулевого уровня флуоресценции хлорофилла. Показано, что величина R_2 менее 1 характерна для растений, находящихся в состоянии покоя, а величина R_2 больше 1 свидетельствует о том, что растения активно вегетируют (Гаевский и др., 1991).

Как видно на рисунке 2, выход побегов из загрязненного района происходит на сутки быстрее по сравнению с контролем (у сосны 5 и 6 сутки, у ели – 4 и 5 соответственно)

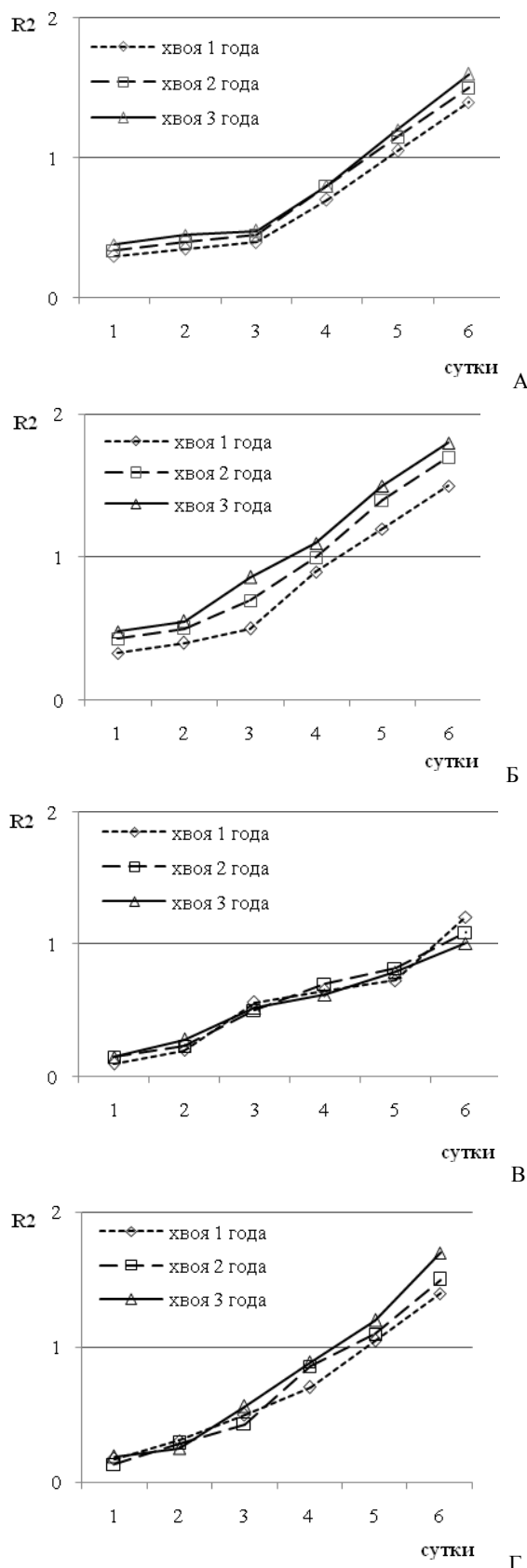


Рисунок 2 - Динамика ТИНУФ хвои ели сибирской (А – ПП1, Б – ПП2) и сосны обыкновенной (В – ПП1, Г – ПП2) в январе 2009 г.

Изменения параметров замедленной флуоресценции при действии факторов внешней среды можно использовать для определения активности фотосинтетического аппарата растений. Во многих случаях устойчивость фотосинтетического аппарата, регистрируемая методом замедленной флуоресценции, коррелирует с общей устойчивостью растительного организма к тому или иному фактору. Таким образом, метод замедленной флуоресценции позволяет с высокой оперативностью и чувствительностью получать многообразную информацию о фотосинтетическом аппарате, по которой можно судить о влиянии стрессовых факторов на исследуемый объект (Гаевский, Моргун, 1993).

Для оценки фотосинтетической активности измеряли относительный показатель замедленной флуоресценции (ОПЗФ) в летний период, сразу после сбора образцов. Как свидетельствуют данные, представленные на рисунке 3, в период активной вегетации фотосинтетическая активность у сосны несколько выше, чем у ели

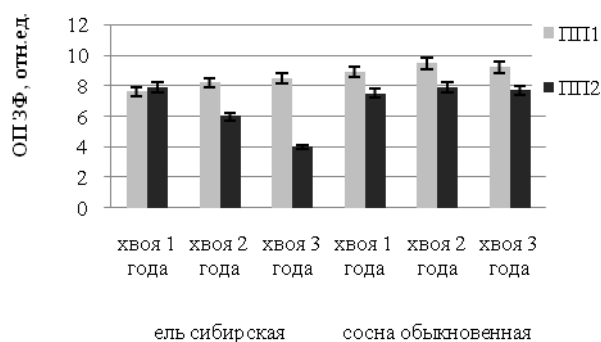


Рисунок 3 - Величина ОПЗФ хвои разного возраста у сосны обыкновенной и ели сибирской в период активной вегетации (август 2009)

Тот факт, что в загрязнённых районах хвоя сосны всех трех возрастов, в отличие от хвои ели, сохраняет свою фотосинтетическую активность практически на одном уровне, указывает на различную стратегию адаптации деревьев сосны обыкновенной к загрязнению окружающей среды. Она, по-видимому, заключается в том, что растения в загрязнённых районах для обеспечения своих энергетических потребностей поддерживают в фотоактивном состоянии только часть хвои. Старая хвоя, которая подверглась более сильному воздействию загрязнителей, перестает обеспечиваться питательными веществами и становится своеобразным хранилищем токсикантов, вследствие чего погибает. В пользу данного предположения свидетельствует и тот факт, что исследованные нами побеги сосны обыкновенной из разных по уровню загрязнения районов различаются по морфологическим показателям значительно сильнее, чем побеги ели сибирской (табл. 3). В частности, в загрязнённом районе, количество хвои сосны от первого года к третьему уменьшается в три раза, тогда как у ели в 1,25 раза. У ели заметно больше хвои с некрозами и хлорозами, тогда как некротизированная хвоя сосны сбрасывается.

Таблица 2 - Морфологические параметры побегов ели сибирской и сосны обыкновенной из районов с различным уровнем загрязнения

Видовое название	Пробная площадь	Возраст побега, лет	Линейный прирост побега, см	Число хвои на 1 см побега	Длина хвои, см	% хвои с некрозами и хлорозами
Ель сибирская	ПП1	1	4,02±1,20	21,30±1,41	1,80±0,12	0,92±0,04
		2	5,10±0,80	19,02±0,95	1,77±0,14	1,05±0,03
		3	6,41±0,92	17,07±0,83	1,82±0,11	1,97±0,07
	ПП2	1	2,90±0,60	20,51±1,12	1,46±0,09	1,65±0,09
		2	4,03±0,55	17,36±0,87	1,83±0,13	8,59±0,43
		3	4,65±0,71	16,02±0,90	1,69±0,21	9,58±1,22
Сосна обыкновенная	ПП1	1	7,32±1,30	12,14±0,80	5,95±1,93	0,72±0,04
		2	6,90±0,91	11,51±0,58	6,73±1,52	1,06±0,05
		3	7,53±0,86	7,00±1,52	6,48±1,41	1,54±0,11
	ПП2	1	5,71±0,62	12,52±0,71	5,17±1,55	1,63±0,10
		2	5,96±0,80	7,06±0,33	5,14±1,62	2,08±0,12
		3	4,54±0,75	4,05±0,41	5,08±1,70	3,27±0,40

Таким образом, нужно отметить, что сосна обыкновенная и ель сибирская используют разные стратегии устойчивости к загрязнению окружающей среды. У ели в загрязненных районах наблюдается более раннее старение хвои и перераспределение пигментов и фото-синтетической активности в сторону хвои младших возрастов. У сосны значительная часть токсикантов аккумулируется в отдельных хвоинках и удаляется в процессе дефолиации, поэтому оставшаяся хвоя фотосинтезирует достаточно активно. Вероятно, такая экологическая пластичность сосны может быть связана с особенностями прикрепления хвои к побегу, что способствует большей устойчивости сосны обыкновенной к загрязнению воздушной среды по сравнению с елью сибирской

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гаевский Н.А., Моргун В.Н. Использование переменной и замедленной флуоресценции хлорофилла для изучения фотосинтеза растений // Физиология растений, 1993. - Т. 40. - № 1. - С. 136-143.
- Гаевский Н.А., Сорокина Г.А., Гехман А.В., Фомин С.А., Гольд В.М. Способ определения степени глубины покоя древесных растений. Авторское свидетельство №1358843 от 15.08.87
- Гаевский Н.А., Сорокина Г.А., Гольд В.М., Миролюбовская И.В. Сезонные изменения фотосинтетического аппарата древесных и кустарниковых растений // Физиология растений. - 1991. - Т. 38. - Вып. 4. - С. 685.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2007 год» - Красноярск 2008. - 266 с.
- Григорьев Ю.С., Фуряев Е.А., Андреев А.А. Способ определения содержания фитотоксических веществ. Патент № 2069851. Бюлл. изобр., №33 от 27.11.96.
- Григорьев Ю. С., Пахарькова Н. В. Влияние техногенного загрязнения воздушной среды на состояние зимнего покоя сосны обыкновенной // Экология. - 2001. - № 6. - С. 471 - 473.
- ИСО 10304-1-92 «Качество воды. Определение растворенных фторида, хлорида, нитрита, ортофосфата, бромиды, нитрата и сульфата методом жидкостной ионной хроматографии. Часть 1. Метод для вод с малыми степенями загрязнения»
- Лопатин А.П., Лесных В.В., Шеховцова А.И. Карта «Экологическое состояние окружающей среды г. Красноярск». Масштаб 1: 25000 / Составлена в Красноярском филиале Госцентра «Природа». - 1993.
- Сазонова Т.А., Колосова С.В. Водный режим *Pinus sylvestris* и *Picea obovata* (Pinaceae) в условиях промышленного загрязнения / Ботанический журнал. - 2007. - Т. 92, № 5. - С. 740-750.
- Софронова В.Е., Чепалов В.А. Адаптивные изменения состава фотосинтетических пигментов хвои *Pinus sylvestris* L. при понижении температуры // Наука и образование. - 2007. - № 2. - С. 34-39.
- Arora C.L., Bajwa M.S. Comparative study of some methods of oxidation of plant materials for elemental analysis // Current Science. 2009- V. 66, №4. - P. 314-318.
- Ayodele J. T., Ahmed A. Monitoring air pollution in Kano municipality by chemical analysis of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) needles for sulphur content // The Environmentalist. - 2001. - № 21. - P. 145-151.
- Gerald S. Pullman, Mike Buchanan. Identification and quantitative analysis of stage-specific organic acids in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) zygotic embryo and female gametophyte // Plant Science. - 2006. - V. 170, Issue 3. - P. 634-647.
- Tsutsunimoto K., Tsuji K. Time-resolved x-ray fluorescence for monitoring the intake of mineral nutrients in living plants // X-Ray Spectrom. - 2007. - V. 36. - P. 324-327.
- Vernon L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // Analytical Chemistry. 1960. V. 32. № 9. P. 1144-1150.
- Vogg G., Heim R., Hansen J., Schafe, C., Beck E. Frost hardening and photosynthetic performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. Seasonal changes in the photosynthetic apparatus and its function // Planta. -1998. -V. 204, № 2. -P. 193-200.
- Yilmaz S., Zengin M. Monitoring environmental pollution in Erzurum by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles // Environment International. - 2004. -V. 29, № 8. - P. 1041-1047.

Поступила в редакцию 25 апреля 2010 г.
Принята к печати 13 октября 2010 г.