

УДК 581.13+574.24

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ

М. В. Оскорбина¹, О. В. Калугина¹, Л. В. Афанасьева²

¹ Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 13

² Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: omaria-84@yandex.ru, olignat32@inbox.ru, afanl@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

Исследовано влияние выбросов Братского алюминиевого завода (БрАЗа) на фотосинтетический аппарат лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). На основе данных о содержании элементов-поллютантов (фтора, серы, тяжелых, легких металлов и металлоидов) в хвое деревьев с использованием кластерного анализа на обследованной территории выделены древостои критического, сильного, среднего, слабого уровня загрязнения, а также фоновые. Установлено, что в хвое деревьев с ростом уровня загрязнения снижается содержание пигментов: хлорофилла *a* – на 68 %, хлорофилла *b* – на 72 %, каротиноидов – на 67 % по сравнению с фоновым уровнем. Морфометрические параметры ассимиляционных органов загрязненных деревьев (длина ауксибластов второго года жизни, масса хвои на них, а также длина хвои) снижаются по сравнению с фоновыми показателями на 45–65 %; минимальные их значения обнаруживаются при критическом уровне загрязнения (на территории промзоны БрАЗа). О наличии функциональных нарушений фотосинтетического аппарата хвои в условиях загрязнения выбросами алюминиевого завода свидетельствует изменение параметров флуоресценции хлорофилла: уменьшение фотохимической активности фотосистемы II (F_v/F_m) на 7 %, скорости электрон-транспортного потока (ETR) – на 26 %, квантового выхода фотосистемы II ($\Phi(II)$) – на 35 %, а также увеличение фоновой флуоресценции хлорофилла F_0 на 26–35 % и нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла (NPQ) на 27 % по сравнению с фоновыми значениями. Максимальное негативное влияние выбросов на фотохимические процессы хвои лиственницы зафиксировано при критическом уровне загрязнения древостоев.

Ключевые слова: *Larix sibirica* Ledeb., флуоресценция хлорофилла, морфометрические параметры хвои, аэротехногенное загрязнение.

DOI: 10.15372/SJFS20240104

ВВЕДЕНИЕ

Строение фотосинтетического аппарата и процесс фотосинтеза – сложный комплекс взаимосвязанных структур и функционально связанных активных систем, обеспечивающих растение энергией и первичными продуктами, что определяет способность растительного организма к существованию (Клячко-Гурвич и др., 2000; Klyachko-Gurvich et al., 2000). Исследование взаимосвязи структурных и функциональных свойств отдельных органов и тканей растений

является основным звеном в изучении механизмов адаптации растений к различным условиям среды (Гамалей, 1990; Шереметьев, 2005).

Лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) – самая распространенная лесообразующая порода на территории Евразии и Северной Америки. В Иркутской области лиственничные леса занимают более 18 403 тыс. га (Государственный доклад..., 2021). Эколого-физиологические особенности лиственницы, произрастающей в Сибири, достаточно хорошо изучены (Суворова и др., 2003; Корзухин и др., 2004;

Korzukhin et al., 2004; Загинова, 2007). Она считается светолубивым и быстрорастущим видом, который характеризуется высокой фотосинтетической продуктивностью в условиях жаркого и достаточно влажного лета (Суворова, 2009).

В современный период к одним из приоритетных негативных факторов, оказывающих влияние на состояние лесных экосистем Иркутской области, относится атмосферное промышленное загрязнение (Михайлова и др., 2020). Существенный вклад в загрязнение окружающей среды региона вносит алюминиевая промышленность. На территории региона расположено три алюминиевых завода, крупнейший из которых – Братский алюминиевый завод (БрАЗ), введенный в эксплуатацию в 1966 г. и выпускающий более 1 млн т первичного алюминия. Ежегодный объем аэровыбросов БрАЗа составляет более 75 тыс. т загрязняющих веществ (Государственный доклад..., 2021). Наиболее токсичными компонентами выбросов завода являются фторсодержащие соединения, оксиды серы, азота, углерода, неорганическая пыль, в составе которой значительна доля алюминия, кремния, кальция, магния, натрия и тяжелых металлов.

Известно, что по состоянию фотосинтетического аппарата можно оценить степень влияния аэротехногенного загрязнения на растения, а также выявить возможные пути их приспособления к этому негативному фактору. Многие исследователи отмечают, что при техногенном воздействии повреждение ассимиляционного аппарата в первую очередь проявляется на физиолого-биохимическом уровне, затем распространяется на ультраструктурный и клеточный уровень и лишь после этого развиваются видимые признаки повреждения – хлорозы и некрозы тканей листа, опадение листьев и торможение роста (Тужилкина, 2017). При анализе литературных данных обнаружено, что в основном исследовалось влияние техногенных эмиссий на состояние ассимиляционных органов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (Михайлова и др., 2006; Тужилкина, 2021), тогда как работы по другим видам хвойных пород немногочисленны. На наш взгляд, изучение морфологических и физиологических особенностей листопадных хвойных пород, представителем которых является лиственница сибирская, позволит расширить представление о механизмах приспособления деревьев к изменяющимся условиям среды.

Цель данной работы – выявить влияние атмосферных выбросов алюминиевого про-

изводства (на примере БрАЗа) на изменение структурно-функциональной организации фотосинтетического аппарата хвои лиственницы сибирской.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Натурные обследования лесов проводились в северо-западной части Иркутской области, на территории рассеивания эмиссий БрАЗа. В соответствии с международной методикой ICP Forests (Manual..., 2010), в 2020 г. было заложено 12 пробных площадей (пп) в древостоях, расположенных на разном удалении от завода в сторону преобладающего атмосферного переноса (северо-восточное направление). Пп закладывали в древостоях, сходных по возрасту и бонитету (60–80-летние, III класса бонитета, полнота 0,5–0,6), а также по лесорастительным условиям (тип леса – сосняк разнотравный, почвы – серые лесные). Каждая пп была округлой формы, радиусом около 50 м и площадью около 0,01 км².

Объектом исследования служили деревья лиственницы сибирской. На каждой пп конвертным методом выбрано 3 ключевых участка (КУ) размером около 100 м², на которых в середине вегетационного периода, после окончания фазы роста побегов, с помощью секатора срезали 5–7 боковых побегов с южной и юго-восточной сторон от средней части крон пяти 60-летних деревьев. Хвою отделяли от побегов, тщательно перемешивали и делили на две части. Хвою, собранную с одного КУ, анализировали отдельно.

Уровень загрязнения древостоев лиственницы определяли по содержанию в хвое фтора, серы, тяжелых и легких металлов, а также металлоидов (Al, As, Ba, Be, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, La, Li, Mo, Ni, Pb, Sc, Si, Sr, Ti, V, Y, Zn). Для определения концентрации элементов образцы сухой измельченной хвои минерализовали в муфельной печи при температуре 450 °С в течение 3 ч до состояния однородной золы. В полученных растворах содержание элементов определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре SPECTRO ARCOS (фирмы Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия) в аккредитованной лаборатории ГKK ГП «РАЦ» (г. Улан-Удэ, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511112). Для контроля аналитического качества процедур использовали стандартные образцы NCS DC 73350, относительная ошибка метода не превышала 5–10 %. Содержание фтора в хвое сосны определяли спектрофотометрически при

длине волны 540 нм с индикатором ксиленоловым оранжевым после сухого озоления пробы и дистилляции полученной золы с водяным паром в хлорной кислоте, используя сернокислосеребро для удаления сопутствующих примесей хлора (Михайлова и др., 2006). Все определения выполнены в трех биологических и трех аналитических повторностях.

Методика ранжирования древостоев по уровню загрязнения была описана нами ранее (Kalugina et al., 2021). Для этого применялся кластерный анализ данных о содержании элементов-поллютантов в хвое деревьев на всех пп. Для каждого уровня загрязнения были рассчитаны индексы биогеохимической трансформации элементного состава хвои (*Zbt*), по формуле

$$Zbt = \sum_{i=1}^{n1} EF + \sum_{i=1}^{n2} DF - (n1 + n2 - 1), \quad (1)$$

где *EF* – коэффициент концентрации, а *DF* – коэффициент деконцентрации, *n1* и *n2* число элементов с *EF* > 1.5 и *DF* > 1.5 соответственно. Коэффициент концентрации вычисляется как отношение C_{pol}/C_b , а коэффициент деконцентрации – C_b/C_{pol} , где C_{pol} и C_b – концентрации элементов на загрязненных и фоновых территориях соответственно. Индекс *Zbt* – количественное выражение дисбаланса химических элементов в растениях, возникающего в результате техногенной нагрузки. Он имеет пять градаций: минимальную (10–20), среднюю (21–30), высокую (31–40), очень высокую (41–60), чрезвычайно высокую (61 и более) (Касимов и др., 2012).

Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом в замороженной хвое после предварительной экстракции 96%-м этанолом (Vernon, 1960). Оптическую плотность измеряли при 665, 649 и 440.5 нм. Пигменты рассчитывали по формулам J. F. Wintermans и A. De Mots (1965). Долю хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) рассчитывали по формуле Н. К. Lichtenthaler [1987]

$$ССК = (1.2 \text{ хл } b + \text{ хл } b) / \Sigma (\text{ хл } a + \text{ хл } b). \quad (2)$$

Для исследования параметров флуоресценции хлорофилла на каждом КУ с 3–5 деревьев срезали по три ветви и сразу измеряли параметры флуоресценции хлорофилла с помощью импульсного флуориметра PAM2000 (Waltz, Effeltrich, Germany). После прикрепления датчиков к хвое побеги в течение 20 мин подвергались темновой адаптации. Далее измеряли показатели флуоресценции хлорофилла на каждом

побеге. Регистрировали следующие параметры: F_0 – фоновая флуоресценция, F_m – максимальная флуоресценция, F_v – переменная флуоресценция – величина, равная разнице между общей максимальной флуоресценцией и ее исходным (фоновым) уровнем ($F_v = F_m - F_0$), $Y(II)$ – квантовый выход фотосистемы II, NPQ – квантовый выход нефотохимического тушения, ETR – скорость электрон-транспортного потока, а также рассчитывали соотношение F_v/F_m – показатель фотохимической активности фотосистемы – II по формуле

$$F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m. \quad (3)$$

Для определения содержания воды в хвое использовали рефрактометрический метод (Гусев, 1960), основанный на способности воды выходить из тканей растений в гипертонический раствор сахарозы. Общее содержание воды определяли как разность между массой сырой и сухой навески хвои, свободной (слабо связанной) водой считали ту воду, которая извлекается из хвои при помощи 30%-го раствора сахарозы. Разность между общим содержанием воды и ее свободной фракцией составляла связанная (физиологически активная) вода. Для всех фракций воды определена их массовая доля (в % от сырой массы хвои).

Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных методов (Зайцев, 1990) и пакета PASTv3.17. Полученные данные были проверены на нормальность (Shapiro-Wilk's test, $p < 0.05$) и равенство дисперсий (Levene's test). В работе приведены средние значения параметров пигментного комплекса, содержания воды в хвое для двух пп, расположенных в каждой зоне удаления от завода, стандартное отклонение (δ). Различия между пп оценивали с помощью пакета several-sample tests (ANOVA, Kruskal-Wallis), при значимом результате использовали критерий множественного сравнения (Tukey's test, $p \leq 0.05$). Достоверность различий параметров флуоресценции хлорофилла оценивали с помощью критерия Манна – Уитни (Statistica), $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нерегулируемое поступление элементов-поллютантов с выбросами алюминиевого завода неизбежно ведет к увеличению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере и других компонентах окружающей среды. В растениях поллютанты способны поступать через устьица,

Таблица 1. Коэффициенты концентраций элементов-поллютантов и индекс биогеохимической трансформации элементного состава хвои (*Zbt*) лиственницы сибирской при разных уровнях техногенного загрязнения эмиссиями БрАЗа

Уровень техногенного загрязнения древостоев	Коэффициенты концентраций элементов-поллютантов	<i>Zbt</i>
Слабый	$\text{Cd}_{2,2}\text{-La}_{2,2}\text{-Li}_{2,1}\text{-Al}_{1,8}\text{-Co}_{1,8}\text{-F}_{1,8}\text{-Ni}_{1,8}\text{-Ba}_{1,7}\text{-Cr}_{1,7}\text{-S}_{1,7}\text{-Be}_{1,6}\text{-Pb}_{1,6}\text{-Sr}_{1,6}\text{-Ti}_{1,6}\text{-V}_{1,6}\text{-Y}_{1,6}$	13.4 ± 3.6
Средний	$\text{Li}_{3,8}\text{-Ni}_{3,3}\text{-Y}_{3,2}\text{-Al}_{3,1}\text{-F}_{2,9}\text{-Sr}_{2,9}\text{-La}_{2,7}\text{-V}_{2,6}\text{-Ce}_{2,1}\text{-Fe}_{2,1}\text{-Ti}_{2,1}\text{-Co}_{2,1}\text{-S}_{2,0}\text{-Ba}_{1,9}\text{-Pb}_{1,9}\text{-As}_{1,8}\text{-Cd}_{1,7}\text{-Cr}_{1,7}\text{-Be}_{1,6}\text{-Cu}_{1,6}\text{-Si}_{1,5}$	28.6 ± 4.8
Сильный	$\text{Al}_{8,1}\text{-F}_{7,1}\text{-Ni}_{6,4}\text{-Y}_{5,2}\text{-Cr}_{4,9}\text{-V}_{4,9}\text{-Li}_{4,5}\text{-Ti}_{4,1}\text{-Fe}_{3,8}\text{-Ce}_{3,6}\text{-La}_{3,5}\text{-Pb}_{3,5}\text{-Co}_{3,1}\text{-Be}_{2,9}\text{-S}_{2,1}\text{-Sr}_{2,0}\text{-As}_{1,9}\text{-Sc}_{1,9}\text{-Ba}_{1,8}\text{-Cd}_{1,7}\text{-Mo}_{1,6}\text{-Si}_{1,6}\text{-Cu}_{1,6}$	59.8 ± 10.6
Критический	$\text{F}_{31,8}\text{-Al}_{22,8}\text{-Ni}_{16,4}\text{-V}_{11,8}\text{-Li}_{8,9}\text{-Cr}_{7,4}\text{-Pb}_{7,1}\text{-Be}_{5,6}\text{-Co}_{3,7}\text{-As}_{3,5}\text{-Ba}_{2,8}\text{-Fe}_{3,8}\text{-S}_{2,8}\text{-Y}_{2,8}\text{-La}_{2,5}\text{-Ti}_{2,3}\text{-Sr}_{2,2}\text{-Cd}_{2,0}\text{-Mo}_{1,9}\text{-Si}_{1,9}\text{-Zn}_{1,9}\text{-Sc}_{1,7}\text{-Ce}_{1,6}\text{-Cu}_{1,6}$	127.8 ± 13.4

путем диффузии через кутикулу, а также в доступной форме адсорбироваться корнями. Результаты проведенных нами исследований показали, что в хвое лиственницы, загрязняемой эмиссиями БрАЗа, значительно увеличивается количество фтора, серы, элементов, входящих в состав твердого аэрозоля (As, Ba, Be, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mo, Ni, Pb, Si, Sr, V, Y, Zn), а также легких металлов (Li, Ti, Al, Sc), поступающих в атмосферу из шламохранилищ, в которых хранятся ядовитые отходы («красный шлам»), образующиеся при производстве алюминия.

На основе кластерного анализа данных о содержании элементов-поллютантов в хвое лиственницы обследованные пп были сгруппированы в пять кластеров, соответствующих разным уровням загрязнения древостоев, при этом пятый кластер сформировали пп, расположенные на фоновой территории (табл. 1). Наиболее высокие коэффициенты концентрации элементов-поллютантов в хвое и значения индекса биогеохимической трансформации элементного состава (*Zbt*) обнаружены при критическом уровне загрязнения. Деревья с такими параметрами выявлены на пп, расположенных в промышленной зоне завода. Древостои с сильным уровнем загрязнения обнаружены на пп, расположенных на расстоянии 1–5 км от завода.

Индекс *Zbt* на этих пп соответствует высокой и очень высокой степени трансформации элементного состава. Древостои со средним уровнем загрязнения обнаружены на расстоянии 6–20 км от завода, индекс *Zbt* соответствует средней степени трансформации элементного состава. Слабо загрязненные древостои обнаружены на расстоянии 21–50 км от завода, у них индекс *Zbt* соответствует минимальной степени трансформации элементного состава.

Фоновые древостои расположены на расстоянии более 50 км от завода; они характеризуются самыми низкими (фоновыми) концентрациями элементов-поллютантов в хвое.

Для оценки работы фотосинтетического аппарата деревьев в условиях загрязнения выбросами БрАЗа было определено содержание пигментов в хвое. При расчете их концентрации на массу хвои одного побега выявляется четкая направленность к уменьшению общего фонда зеленых и желтых пигментов в хвое деревьев по мере усиления техногенной нагрузки (рис. 1). При этом содержание хлорофилла *a* в хвое снижается максимально при критическом уровне загрязнения на 68 %, хлорофилла *b* – на 72 %, каротиноидов – на 67 % по сравнению с фоновыми значениями.

Одним из важнейших показателей состояния пигментного комплекса растений является также содержание хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) от общего фонда зеленых пигментов хвои (Тужилкина, 2021). Обнаружено, что наиболее низкое содержание хлорофилла в ССК характерно для деревьев критического и среднего уровня загрязнения (рис. 1).

Причем в первом случае это снижение связано с относительно равномерным уменьшением концентрации как хлорофилла *a*, так и хлорофилла *b* в хвое. При среднем же уровне загрязнения в хвое деревьев наблюдается более резкое уменьшение содержания хлорофилла *b*, что, как отмечают некоторые исследователи (Lichtenthaler, 1987; Янин, 2007; Маторин, Алексеев, 2013; Иванова, Суворова, 2014; Orekhov et al., 2015; Тужилкина, 2021), может быть связано с адаптивной перестройкой ультраструктуры хлоропластов в сторону «светового типа» (увеличение доли тилакоидов стромы) для повыше-

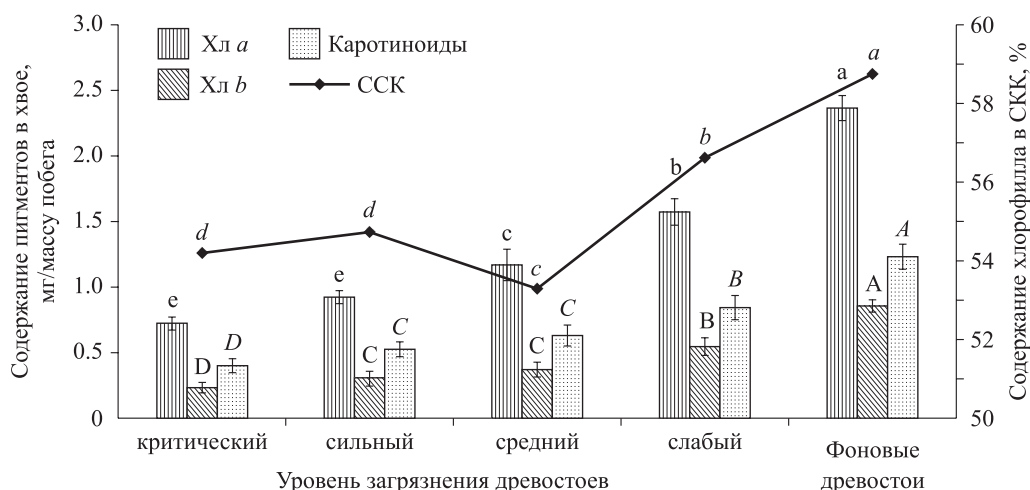


Рис. 1. Содержание пигментов в хвое лиственницы сибирской при разном уровне загрязнения эмиссиями БрАЗа.

Разные буквы в одном ряду представляют статистически значимые различия между зонами ($p < 0.05$, $n = 30$), где $a > b > c > d > e$.

ния эффективности светоусвоения и защищенности от фотоповреждений. Возможно, именно при среднем уровне загрязнения деревьев лиственницы начинают срабатывать эти защитные механизмы.

Наиболее высокие значения хлорофилла в ССК отмечаются на пп, расположенных на расстоянии свыше 20 км от завода, т. е. при слабом уровне загрязнения деревьев и на фоновых территориях, где фотосинтетический аппарат максимально проявляет функциональные возможности путем увеличения светособирающей функции фотосинтетического аппарата.

В целом полученные результаты свидетельствуют о наиболее значимых изменениях в пигментном фонде хвои лиственницы при критическом, сильном и среднем уровнях загрязнения, т. е. на расстоянии до 20 км от завода. На большем расстоянии изменения фотосинтетической способности деревьев менее выражены или отсутствуют.

Для оценки влияния выбросов БрАЗа на состояние фотосинтетического аппарата лиственницы сибирской проведен анализ морфометрических показателей побегов и хвои при разном уровне загрязнения деревьев (табл. 2).

Отмечено, что в большей степени с увеличением техногенной нагрузки изменяются такие параметры, как длина ауксибластов 2-го года жизни, масса хвои на них, а также длина хвои. Значения этих показателей снижаются по сравнению с фоновыми от 45 до 65 %.

Для характеристики функциональных особенностей ФСА лиственницы сибирской в условиях воздействия эмиссий алюминиевого производства провели анализ параметров флуоресценции хлорофилла (рис. 2).

На территории рассеивания эмиссий БрАЗа в хвое деревьев обнаружена тенденция к снижению соотношения F_v/F_m максимально на 7 %, скорости электрон-транспортного потока (ETR) – на 26 % и фоновой флуоресценции (F_0)

Таблица 2. Морфометрические показатели побегов лиственницы сибирской при разном уровне загрязнения

Параметры	Уровень загрязнения				Фоновые древостои
	критический	сильный	средний	слабый	
Ауксибласт 2-го года жизни:					
число брахибластов на нем, шт.	13.60 ^c ± 3.42	14.80 ^c ± 3.18	14.70 ^c ± 2.16	17.43 ^b ± 5.64	19.73 ^a ± 3.82
сырая масса хвои на нем, г	0.71 ^d ± 0.10	1.09 ^c ± 0.41	0.94 ^c ± 0.12	1.44 ^b ± 0.36	1.58 ^a ± 0.44
длина, мм	9.50 ^c ± 17.8	115.20 ^b ± 18.6	100.60 ^b ± 18.0	95.89 ^b ± 13.82	150.89 ^a ± 1.51
сырая масса, г	0.47 ^b ± 0.02	0.42 ^b ± 0.01	0.29 ^c ± 0.01	0.47 ^b ± 0.01	0.75 ^a ± 0.02
Длина хвои, мм	18.86 ^c ± 3.08	23.52 ^c ± 3.42	32.63 ^b ± 5.08	34.44 ^b ± 5.04	35.56 ^a ± 4.12

Примечание. Разные буквы в одном ряду представляют статистически значимые различия между зонами ($p < 0.05$, $n = 30$), где $a > b > c > d$.

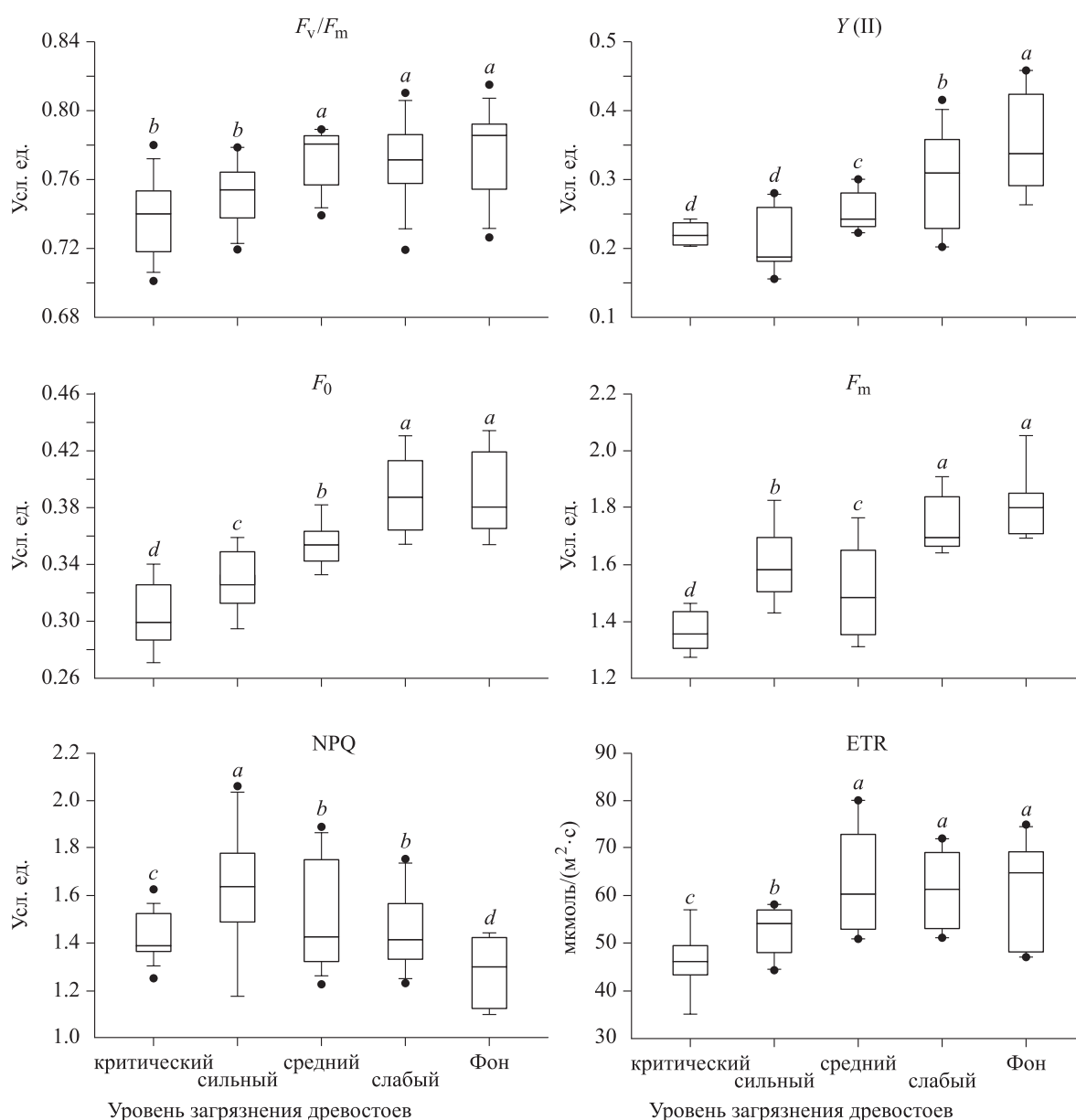


Рис. 2. Параметры флуоресценции хлорофилла хвои лиственницы сибирской при разном уровне загрязнения.

Разные буквы в одном ряду представляют статистически значимые различия между зонами ($p < 0.05$, $n = 30$), где $a > b > c > d$.

на 26–35 %, по сравнению с фоновыми показателями, равными 0.79 усл. ед., 61.26 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ и 0.39 усл. ед. соответственно.

При исследовании нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла (NPQ) обнаружена статистически значимая тенденция к повышению этого показателя на техногенно загрязняемых пп на 25 %. Квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$) был существенно ниже на загрязненных пп (около 35 %) по сравнению с фоновыми пп. Полученные данные могут свидетельствовать об ухудшении светопоглощающих

свойств фотосинтетического аппарата лиственницы в условиях воздействия эмиссий БрАЗа.

Важным показателем состояния (угнетенного или оптимального) растительного организма является влагообеспеченность. Согласно общепринятому представлению, содержание свободной воды определяет интенсивность физиологических процессов, содержание связанной воды – устойчивость растений к неблагоприятным условиям среды (Алексеев, 1984; Nazrati et al., 2016; Gameiro et al., 2016). Проведенные нами исследования не выявили существенных

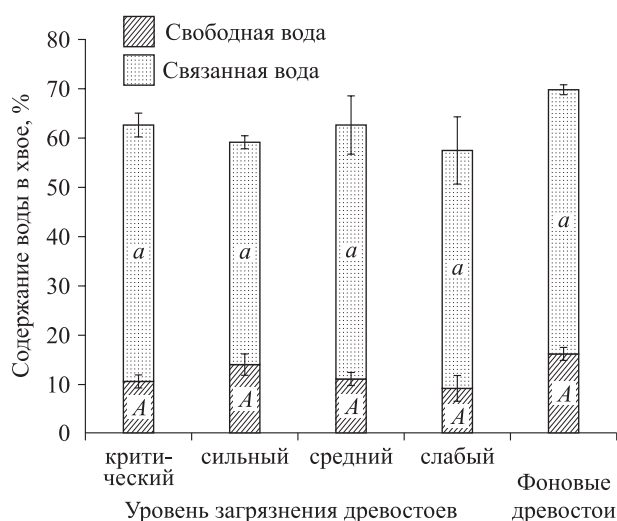


Рис. 3. Содержание воды в хвое лиственницы сибирской при разном уровне загрязнения.

Одинаковые буквы в одном ряду представляют статистически незначимые различия между зонами ($p < 0.05$, $n = 30$).

различий в параметрах оводненности хвои фоновых и загрязняемых деревьев (рис. 3).

Это может свидетельствовать о том, что ФСА лиственницы в середине вегетационного периода максимально использует ресурсы среды и места произрастания деревьев не влияют на показатели влагообеспеченности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены данные об изменении структурно-функциональной организации фотосинтетического аппарата хвои лиственницы сибирской на территориях, загрязняемых высокотоксичными эмиссиями Братского алюминиевого завода. Воздействие загрязнения рассматривалось в динамике, при его нарастании от слабого до среднего, сильного и критического уровня. Установлено, что в условиях техногенного загрязнения выбросами алюминиевого завода в хвое лиственницы происходят существенные нарушения в работе фотосинтетического аппарата, о чем свидетельствует снижение содержания хлорофиллов a , b и каротиноидов, уменьшение показателя фотохимической активности фотосистемы II (F_v/F_m), скорости электронтранспортного потока (ETR), а также квантовый выход фотосистемы II ($Y(II)$) и увеличение фоновой флуоресценции хлорофилла F_0 и нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла (NPQ) по сравнению с фоновыми значениями. Наиболее сильные изменения наблюдаются в хвое деревьев при кри-

тическом уровне загрязнения, когда содержание элементов-поллютантов в хвое достигает максимальных значений.

Исследования выполнены в рамках государственных заданий: 0277-2022-0003 № 122041100058-2 (СИФИБР СО РАН), FWSS-2022-0002 № 122041100045-2 (СИФИБР СО РАН), и FWSM-2021-0001 № 121030900138-8 (ИОЭБ СО РАН), а также частично при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-44-380009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А. М. Водный режим растения и влияние на него засухи. Казань: Татиздат, 1984. 180 с.
- Гамалей Ю. В. Флоэма листа: развитие структуры и функции в связи с эволюцией цветковых растений. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 144 с.
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2020 г.». Иркутск: Мегапринт, 2021. 330 с.
- Гусев Н. А. Некоторые методы исследования водного режима растений. Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 61 с.
- Загирова С. Структура хвои и фотосинтез лиственницы на Крайнем Севере // Вестн. Ин-та биол. Коми науч. центра УрО РАН. 2007. № 5. С. 7–9.
- Зайцев Г. Н. Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука. 1990. 296 с.
- Иванова М. В., Суворова Г. Г. Структура и функция фотосинтетического аппарата хвойных в условиях юга Восточной Сибири. Иркутск: Ин-т геогр. им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2014. 79 с.
- Касимов Н. С., Битюкова В. Р., Кислов А. В., Кошелева Н. Е., Никифорова Е. М., Малхазова С. М., Шартова Н. В. Проблемы экогеохимии крупных городов // Охрана и разведка недр. 2012. № 7. С. 8–13.
- Клячко-Гурвич Г. Л., Пронина Н. А., Ладыгин В. Г., Цоглин Л. Н., Семенов В. Е. Разобщенное функционирование отдельных фотосистем. I. Особенности и роль десатурации жирных кислот // Физиол. раст. 2000. Т. 47. № 5. С. 688–698.
- Корзунин М. Д., Выгодская Н. Н., Милокова И. М., Татаринов Ф. А., Цельникер Ю. Л. Применение объединенной модели фотосинтеза и устьичной проводимости к анализу ассимиляции углерода елью и лиственницей в лесах России // Физиол. раст. 2004. Т. 51. № 3. С. 341–354.
- Маторин Д. Н., Алексеев А. А. Флуоресценция хлорофилла для биоиндикации растений. М.: ПКЦАльтекс, 2013. 364 с.
- Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Игнатьева О. В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: Ин-т геогр. им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2006. 134 с.
- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых

- лесов на примере Иркутской области // Лесоведение. 2020. № 3. С. 265–273.
- Суворова Г. Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. 195 с.
- Суворова Г. Г., Щербатюк А. С., Янькова Л. С., Копытова Л. Д. Максимальная интенсивность фотосинтеза ели сибирской и лиственницы сибирской в Прибайкалье // Лесоведение. 2003. № 6. С. 58–65.
- Тужилкина В. В. Фотосинтетические пигменты хвои ели сибирской в среднетаежных лесах Европейского Северо-Востока России // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 65–73.
- Тужилкина В. В. Влияние аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажного производства на пигментный комплекс сосны обыкновенной // Теор. и прикл. экол. 2021. № 1. С. 90–96.
- Шереметьев С. Н. Травы на градиенте влажности почвы. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2005. 271 с.
- Янин Е. П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // Пробл. окр. среды и природ. рес. 2007. № 8. С. 70–90.
- Gameiro C., Utkin A. B., Cartaxana P., Silva J. M. da, Matos A. R. The use of laser induced chlorophyll fluorescence (LIF) as a fast and non-destructive method to investigate water deficit in *Arabidopsis* // Agr. Water Manag. 2016. V. 164. Part 1. P. 127–136.
- Hazrati S., Tahmasebi-Sarvestani Z., Modarres-Sanavy S. A. M., Mokhtassi-Bidgoli A., Nicola S. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. // Plant Physiol. Biochem. 2016. V. 106. P. 141–148.
- Kalugina O. V., Mikhailova T. A., Afanasyeva L. V., Gurina V. V., Ivanova M. V. Changes in the fatty acid composition of pine needle lipids under the aluminum smelter emissions // Ecotoxicology. 2021. V. 29. N. 4. P. 1287–1289.
- Klyachko-Gurvich G. L., Pronina N. A., Ladygin V. G., Tsoglin L. N., Semenenko V. E. Uncoupled functioning of separate photosystems: 1. Characteristics of fatty acid desaturation and its role // Rus. J. Plant Physiol. 2000. V. 47. N. 5. P. 603–612 (Original Rus. Text © 2000 G. L. Klyachko-Gurvich, N. A. Pronina, V. G. Ladygin, L. N. Tsoglin, V. E. Semenenko, publ. in Fiziologiya Rasteniy. 2000. V. 47. N. 5. P. 688–698).
- Korzukhin M. D., Vygodskaya N. N., Milyukova I. M., Tatarinov F. A., Tsel'niker Yu. L. Application of a coupled photosynthesis-stomatal conductance model to analysis of carbon assimilation by spruce and larch trees in the forests of Russia // Rus. J. Plant Physiol. 2004. V. 51. N. 3. P. 302–315 (Original Rus. Text © 2004 M. D. Korzukhin, N. N. Vygodskaya, I. M. Milyukova, F. A. Tatarinov, Yu. L. Tsel'niker, publ. in Fiziologiya Rasteniy. 2004. V. 51. N. 3. P. 341–354).
- Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. V. 148. P. 350–382.
- 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, 2010. <http://www.icp-forests.org/Manual.htm/>
- Orekhov D. I., Yakovleva O. V., Goryachev S. N., Protopopov F. F., Alekseev A. A. The use of parameters of chlorophyll a fluorescence induction to evaluate the state of plants under anthropogenic load // Biophysics. 2015. V. 60. Iss. 2. P. 263–268.
- Vernon L. P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // Anal. Chem. 1960. V. 32. Iss. 9. P. 1144–1150.
- Wintermans I. F., De Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their pheophytins in ethanol // Biochem. Biophys. Acta. 1965. V. 109. P. 448–453.

EFFECT OF EMISSIONS FROM ALUMINUM PRODUCTION ON PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF SIBERIAN LARCH

M. V. Oskorbina¹, O. V. Kalugina¹, L. V. Afanas'eva²

¹ Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Lermontov str., 132, Irkutsk, 664033 Russian Federation

² Institute of General and Experimental Biology, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Sakhyanova str., 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047 Russian Federation

E-mail: omaria-84@yandex.ru, olignat32@inbox.ru, afanl@mail.ru

The article presents data on the effect of emissions from the Bratsk Aluminum Plant (BrAZ) on the photosynthetic apparatus of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.). On the basis of data on the content of elements-pollutants (fluorine, sulphur, heavy, light metals and metalloids) in needle trees using cluster analysis the trees of critical, strong, moderate, low level of contamination, as well as background stands were identified in the surveyed area. It has been established that in the needles of trees with an increase in the level of pollution, the content of pigments decreases: chlorophyll a – by 68 %, chlorophyll b – by 72 %, carotenoids – by 67 % compared to the background level. The morphometric parameters of the assimilation organs of polluted trees (the length of auxiblasts of the second year of life, the mass of needles on them, and the length of needles) are reduced by 45–65 % compared to the background values; their minimum values are found at a critical level of pollution (on the territory of the BrAZ industrial zone). The presence of functional disorders of the photosynthetic apparatus of needles in conditions of pollution by emissions from an aluminum plant is evidenced by a change in the parameters of chlorophyll fluorescence: a decrease in the photochemical activity of photosystem II (Fv/Fm) by 7 %, the electron transport flow rate (ETR) – by 26 %, the quantum yield of photosystem II (Y(II)) – by 35 %, as well as an increase in background fluorescence of chlorophyll F0 by 26–35 % and non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence (NPQ) by 27 % compared to background values. The maximum negative impact of emissions on the photochemical processes of larch needles was recorded at the critical level of trees pollution.

Keywords: *Larix sibirica* Ledeb., chlorophyll fluorescence, morphometric parameters of needles, aerotechnogenic pollution.

How to cite: Oskorbina M. V., Kalugina O. V., Afanas'eva L. V. Effect of emissions from aluminum production on photosynthetic apparatus of Siberian larch // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 1. P. 31–39 (in Russian with English abstract and references).