

**СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ
В ЛИСТЯХ «ЗДОРОВЫХ» И «ОСЛАБЛЕННЫХ» ДЕРЕВЬЕВ
ТОПОЛЯ БАЛЬЗАМИЧЕСКОГО (*POPULUS BALSAMIFERA* L.),
ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
(РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН, СТЕРЛИТАМАКСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЦЕНТР)**

© 2022

Гиниятуллин Р.Х.¹, Иванов Р.С.¹, Тагирова О.В.^{2,1}, Кулагин А.Ю.^{1,3}

¹Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН
(г. Уфа, Российская Федерация)

²Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы (г. Уфа, Российская Федерация)

³Уфимский государственный нефтяной технический университет (г. Уфа, Российская Федерация)

Аннотация. В работе представлены результаты исследований по оценке относительного жизненного состояния насаждений тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра (СПЦ). Насаждения тополя санитарно-защитной зоны СПЦ относятся к категории «ослабленные». Внешние признаки угнетения проявляются в уменьшении густоты кроны, увеличении количества мертвых ветвей, поражении ассимиляционного аппарата хлорозами и некрозами. В насаждениях произрастают деревья, относящиеся к категории «здоровые». Показано, что среднее содержание хлорофиллов ($a + b$) в листьях «здоровых» деревьев тополя варьировало в пределах от 25,0 до 28,0 мкг/см² сырой массы, в то время как у «ослабленных» деревьев было сравнительно низким и составляло 17,2–22,6 мкг/см² сырой массы. Снижение суммарного содержания хлорофиллов и ухудшения относительного жизненного состояния деревьев взаимосвязаны. Установлено, что в период активного роста листьев (в июне и начале июля) высокое содержание хлорофиллов и индекса азотного баланса (NBI) отмечается в листьях как «здоровых», так и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического. Взаимосвязь рассматриваемых показателей подтверждаются уравнениями регрессии полиномиальной функции ($y = -2,15x^2 + 8,05x + 23,2$; $y = -2,35x^2 + 8,75x + 19,9$ для листьев «здоровых» деревьев; $y = -3,1x^2 + 11,1x + 13,4$; $y = -3,9x^2 + 14,1x + 10$ для листьев «ослабленных» деревьев), а также коэффициентами детерминации ($R^2 = 1$ для листьев «здоровых» деревьев; $R^2 = 1$ для листьев «ослабленных» деревьев). Максимальные различия по соотношению содержания хлорофиллов ($a + b$) и азотного баланса в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя отмечены в конце августа. В течение вегетационного периода в листьях «ослабленных» деревьев по сравнению с листьями «здоровых» деревьев тополя наблюдается снижение значений NBI и содержания хлорофиллов. При этом существенных изменений в содержании хлорофиллов адаксиальной и абаксиальной стороны листьев «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического в течение вегетации не наблюдается.

Ключевые слова: тополь бальзамический; относительное жизненное состояние; листья; хлорофилл; индекс азотного баланса.

**THE CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS
IN THE LEAVES OF «HEALTHY» AND «WEAKENED»
BALSAM POPLAR TREES (*POPULUS BALSAMIFERA* L.)
GROWING UNDER CONDITIONS OF INDUSTRIAL POLLUTION
(REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN, STERLITAMAK INDUSTRIAL CENTER)**

© 2022

Giniyatullin R.Kh.¹, Ivanov R.S.¹, Tagirova O.V.^{2,1}, Kulagin A.Yu.^{1,3}

¹Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation)

²Akmulla Bashkir State Pedagogical University (Ufa, Russian Federation)

³Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Abstract. The paper presents the results of studies on the assessment of the relative vitality of balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) plantations under the conditions of polymetallic pollution of the Sterlitamak Industrial Center (SIC). Poplar plantations of the sanitary protection zone of the SPC are classified as «weakened». External signs of oppression are manifested in a decrease in crown density, an increase in the number of dead branches, damage to the assimilation apparatus by chlorosis and necrosis. Trees belonging to the «healthy» category grow in the plantations. It was shown that the average content of chlorophylls ($a + b$) in the leaves of «healthy» poplar trees varied from 25,0 to 28,0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ of fresh weight, while in «weakened» trees it was relatively low and amounted to 17,2–22,6 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ wet weight. The decrease in the total content of chlorophylls and the deterioration in the relative vitality of trees are interrelated. It has been established that during the period of active leaf growth (in June and early July), a high content of chlorophylls and nitrogen balance index (NBI) is noted in the leaves of both «healthy» and «wea-

kened» balsam poplar trees. The relationship of the indicators under consideration is confirmed by the regression equations of the polynomial function ($y = -2,15x^2 + 8,05x + 23,2$; $y = -2,35x^2 + 8,75x + 19,9$ for the leaves of «healthy» trees; $y = -3,1x^2 + 11,1x + 13,4$; $y = -3,9x^2 + 14,1x + 10$ for the leaves of «weakened» trees), as well as determination coefficients ($R^2 = 1$ for the leaves of «healthy» trees; $R^2 = 1$ for the leaves of «weakened» trees). The maximum differences in the ratio of chlorophyll content ($a + b$) and nitrogen balance in the leaves of «healthy» and «weakened» poplar trees were noted at the end of August. During the growing season, in the leaves of «weakened» trees, compared with the leaves of «healthy» poplar trees, a decrease in the values NBI and the content of chlorophylls is observed. At the same time, there are no significant changes in the content of chlorophylls on the adaxial and abaxial sides of the leaves of «healthy» and «weakened» balsam poplar trees during the growing season.

Keywords: balsam poplar; relative vitality; leaves; chlorophyll; nitrogen balance index.

Введение

В Стерлитамакском промышленном центре (СПЦ) тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) представлен в насаждениях внутри жилых кварталов, вдоль улиц и автомагистралей, в санитарно-защитной зоне промышленных предприятий [1; 2]. Содержание пигментов фотосинтеза в ассимилирующих органах является одним из основных относительных показателей продуктивности растений [3]. Неблагоприятные факторы окружающей среды, в том числе загрязнители, приводят к изменению активности фотосинтетического аппарата, скорости накопления ассимилянтов, что в конечном итоге отражается на росте и продуктивности растений. Известно, что стрессовые условия, в том числе присутствие в окружающей среде тяжелых металлов, оказывают выраженный ингибирующий эффект на фотосинтетический аппарат растений [4–6]. Известно, что техногенное загрязнение окружающей среды вызывает нарушения в пигментном комплексе растений [7]. Установлено, что снижение содержания хлорофиллов ($a + b$) в листьях растений является реакцией на изменение концентрации углекислого газа в атмосфере [8; 9]. Суммарное содержание хлорофиллов a и b , а также их соотношение используются в качестве индикатора стресса растений [10].

В предыдущих работах было изучено жизненное состояние насаждений тополя бальзамического в условиях полиметаллического загрязнения СПЦ. Установлено, что в насаждениях происходит дифференциация деревьев на «здоровые», «ослабленные», «сильно ослабленные», «усыхающие» и «сухие» [2]. В данной работе поставлена задача определения количественного содержания хлорофиллов ($a + b$) в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического. Также с учетом выраженного атмосферного загрязнения окружающей среды исследовалось содержание хлорофиллов на адаксиальной и абаксиальной сторонах сформированных листьев «здоровых» и «ослабленных» деревьев. С точки зрения характеристики адаптации растений к условиям загрязнения, с учетом статуса деревьев в ценопопуляции оценивался индекс азотного баланса растений (NBI), который представляет собой соотношение количества хлорофиллов и флавоноидов (азота/углерода).

Таким образом, оценка содержания хлорофиллов и индекса азотного баланса (NBI) позволяет охарактеризовать функциональное состояние «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического в санитарно-защитных насаждениях СПЦ.

Объекты и методы исследований

Район исследования расположен в долинах рек Стерля, Ашкадар и Белая. Рельеф характеризуется обширными низменными террасовыми полого-увалистыми равнинами. Естественная травянистая растительность представлена степными, луговыми и болотными флористическими комплексами. Средняя годовая температура воздуха составляет $+3,2^{\circ}\text{C}$, среднее годовое количество осадков – 498,9 мм. Преобладают ветры южного, юго-западного и северного направлений. Почвообразующими породами служат делювиальные и аллювиально-делювиальные отложения. В почвенном покрове преобладают типичные и выщелоченные черноземы [11; 12]. Полевые исследования выполнены на сети постоянных пробных площадей в условиях СПЦ [2].

Объектами исследований выступали «здоровые» и «ослабленные» деревья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в возрасте 50–55 лет, произрастающие в санитарно-защитных насаждениях СПЦ. Оценка относительного жизненного состояния деревьев выполнена по методике В.А. Алексеева [13] с изменениями для лиственных древесных растений [2].

Исследование содержания хлорофиллов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического проводили в 2021 году в середине июня – первой половине июля – конце августа в насаждениях в непосредственной близости от источников нефтехимического и химического загрязнения. На постоянных пробных площадях отбиралось по 10 образцов листьев с 10 «здоровых» и с 10 «ослабленных» деревьев тополя бальзамического.

Для измерения содержания хлорофилла в эпидерме листьев тополя использовали прибор «Dualox Scientific+» («Force-A», Франция). Измеряли количественное содержание фотосинтетических пигментов хлорофиллов ($a + b$), а также индекс азотного баланса (NBI). Прибор позволяет в режиме реального времени измерять содержание суммы хлорофиллов в эпидерме листьев растений и запатентованный FORCE-A новый показатель, называемый NBI® (Nitrogen Balance Index) – индекс азотного баланса растений, который представляет собой соотношение количества хлорофиллов и флавоноидов (азота/углерода) и рассчитывается в условных единицах (у.е.). Измерения проводятся в диапазоне от 0,00 до 3,00 мкг/см² (в расчете на сырую массу), точность абсорбции – 5%. NBI дает вероятность выдавать наиболее раннюю информацию об азотном статусе растения [14]. Содержание хлорофиллов и азотного баланса растений измерялось с адаксиальной и абаксиальной стороны

полностью сформированных листьев «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического.

Фактический материал обрабатывали статистически с использованием общепринятых методов с помощью пакета программы Microsoft Office Excel версии 2016.

Результаты и их обсуждение

Санитарное состояние является одним из важнейших показателей общего состояния тополевых древостоев в промышленном центре. На относительное жизненное состояние древостоев негативное воздействие оказывают промышленные предприятия, расположенные в северной части г. Стерлитамак. Подавляющее большинство деревьев тополя бальзамического в условиях СПЦ на пробной площади относятся к категории «ослабленных» (46%). При этом в насаждениях в составе древостоев имеются «здоровые» (29%), «сильно ослабленные» (20%), «усыхающие» и «сухие» (5%) деревья. Проведенные исследования показали, что под влиянием нефтехимического и химического загрязнений в северной части города происходит уменьшение густоты кроны деревьев (до 34,75%) и образование довольно большого количества мертвых ветвей (до 32,25% от общего количества). Многолетние исследования свидетельствуют, что в конце июля на листьях тополя отчетливо прослеживаются некрозы разных типов: краевые, верхушечные, межжилковые. Отмечаются повреждения листьев (30–35% от общей площади) [15]. Для тополя бальзамического в условиях СПЦ характерно, что листья с некрозами площадью 35% и больше, долгое время остаются в кроне и это согласуется с литературными сведениями [16].

Количественное содержание пигментов в листьях тополя изменяется в течение вегетационного периода (рис. 1). Установлены различия содержания хлорофиллов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя в условиях СПЦ в течение вегетации – в

листьях «ослабленных» деревьев отмечается пониженное суммарное содержание хлорофиллов. Установлен диапазон суммарного содержания хлорофиллов ($a + b$) в листьях тополя от 28 до 30,7 мкг/см². Среднее содержание хлорофиллов в листьях «здоровых» деревьев тополя в июне 29,1 ± 2,21 мкг/см², в июле – 30,7 ± 1,96 мкг/см², а в августе – 28,0 ± 4,64 мкг/см². Наибольшее содержание хлорофиллов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя в условиях СПЦ отмечается в середине вегетационного периода (июль). К концу вегетационного периода содержание хлорофиллов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя снижается. При этом среднее содержание хлорофиллов в листьях «ослабленных» деревьев тополя в течение вегетационного периода варьирует от 18 ± 3,54 мкг/см² до 29 ± 2,21 мкг/см².

Снижение суммарного содержания хлорофиллов в листьях очевидно связано с ухудшением жизненного состояния деревьев. Для получения более полной картины происходящих изменений выполнено измерение содержания хлорофиллов на адаксиальной и абаксиальной сторонах сформированных листьев «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя (табл. 1).

Суммарное содержание хлорофиллов на адаксиальной и абаксиальной сторонах сформированных листьев «здоровых» деревьев тополя в условиях СПЦ изменялось в пределах от 29,6 ± 3,5 до 30,6 ± 3,0 мкг/см² в июле, а в августе от 27,0 ± 9,5 до 29,3 ± 9,8 мкг/см², а «ослабленных» деревьев в июле от 22,5 ± 2,0 до 24,0 ± 4,1 мкг/см², в августе от 19,0 ± 2,5 до 19,7 ± 3,3 мкг/см². Незначительные изменения в содержании хлорофилла адаксиальной и абаксиальной стороны сформированных листьев у «здоровых» и «ослабленных» деревьев обнаружены в августе интервале 0–2,3 мкг/см² (табл. 1). В целом существенных различий в содержании хлорофиллов между абаксиальной и адаксиальной сторонами листьев не обнаружено.

Таблица 1 – Суммарное содержание хлорофиллов на адаксиальной и абаксиальной сторонах листьев «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение вегетационного периода в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра

№ п/п	Содержание хлорофилла ($a + b$) в листьях «здоровых» деревьев, мкг/см ²				Содержание хлорофилла ($a + b$) в листьях «ослабленных» деревьев, мкг/см ²			
	адаксиальная сторона		абаксиальная сторона		адаксиальная сторона		абаксиальная сторона	
	июль	август	июль	август	июль	август	июль	август
1	33,6	28,3	26,3	28,7	23,2	16,7	21,3	16,4
2	31,6	27,7	30,0	26,0	23,5	20,4	24,8	23,0
3	31,6	19,5	31,4	19,7	28,2	21,8	22,5	22,1
4	31,8	33,0	31,0	29,7	21,5	18,0	22,2	19,5
5	30,5	30,0	29,2	30,4	24,0	18,4	25,5	16,7
6	29,9	28,8	29,6	28,5	21,4	18,0	20,0	17,6
7	27,6	29,4	28,9	27,8	26,3	16,6	25,8	16,6
8	33,6	29,9	33,1	29,4	19,9	17,0	21,3	18,8
9	33,3	25,2	28,3	17,5	26,4	19,7	22,3	17,1
10	31,3	39,2	31,1	36,5	23,0	20,9	23,7	20,9
\bar{X}	30,6 ± 3,0	29,3 ± 9,8	29,6 ± 3,5	27,0 ± 9,5	24,0 ± 4,1	19,0 ± 2,5	22,5 ± 2,0	19,7 ± 3,3

Среди элементов минерального питания особое место в жизни растений занимает азот. Азот – обязательный компонент хлорофилла, без которого невозможен процесс фотосинтеза [17]. Азот входит в состав белков, хлорофиллов и других органических соединений. При недостатке азота тормозится рост растений, снижается образование боковых побегов, уменьшается площадь листьев и листья приобретают бледно-зеленую окраску [18; 19]. Представлена характеристика изменений NBI в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя в условиях СПЦ. В процессе измерения содержания хлорофиллов на адаксиальной и абаксиальной сторонах сформированных листьев был рассчитан NBI (табл. 1, рис. 2).

Изменения в содержании хлорофиллов, происходящие в растениях в течение вегетационного периода в условиях загрязнения, сопровождаются изменением индекса азотного баланса NBI (Nitrogen Balance Index) растений, который является индикатором изменения соотношения C/N в сформированных листьях тополя бальзамического. Установлено, что сумма хлорофиллов ($a + b$) в листьях «здоровых» и «ослаб-

ленных» деревьев тополя в июле увеличилась на 5,2–7,7%, что повлияло на увеличение индекса азотного баланса на 6–10,6%. В конце вегетационного периода отмечается снижение рассматриваемых показателей в диапазоне с 2,7 до 4,4 у.е.

В сформированных листьях «здоровых» деревьев тополя наблюдался несколько повышенный NBI в июне и июле (в диапазоне 26,3–28 у.е.), который в конце вегетации снизился до 25 у.е. Для листьев «ослабленных» деревьев тополя наибольшие значения NBI отмечались в июле (22,6 у.е.), при этом в конце вегетации значение снизилось до 17,2 у.е.

Взаимосвязь рассматриваемых показателей подтверждается уравнениями регрессии полиномиальной функции ($y = -2,15x^2 + 8,05x + 23,2$; $y = -2,35x^2 + 8,75x + 19,9$ для листьев «здоровых» деревьев; $y = -3,1x^2 + 11,1x + 13,4$; $y = -3,9x^2 + 14,1x + 10,0$ для листьев «ослабленных» деревьев), а также достаточно высокими коэффициентами детерминации ($R^2 = 1$ для листьев «здоровых» деревьев; $R^2 = 1$ для листьев «ослабленных» деревьев) (рис. 3, 4).

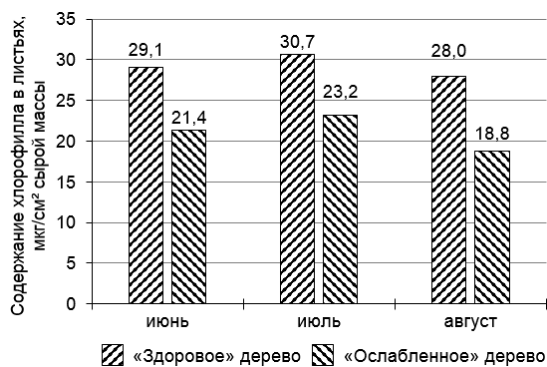


Рисунок 1 – Среднее содержание хлорофиллов ($a + b$) (мкг/см²)

в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение вегетационного периода в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра

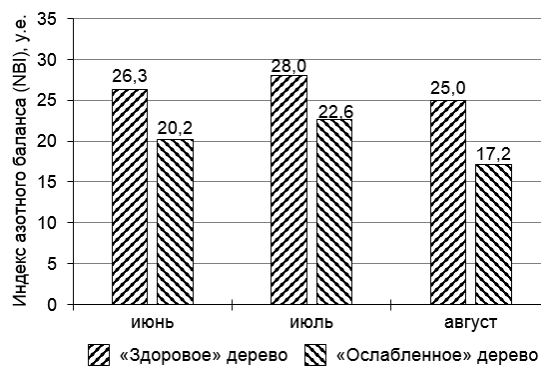


Рисунок 2 – Изменение индекса азотного баланса (NBI)

в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение вегетационного периода в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра

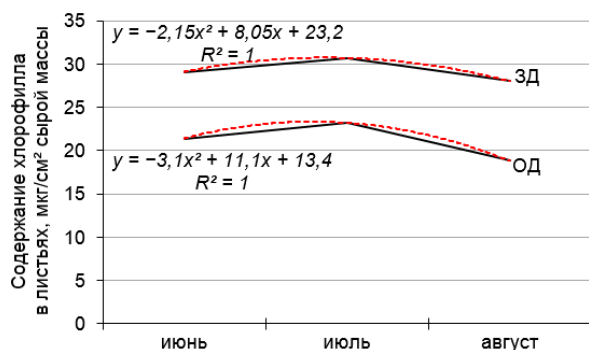


Рисунок 3 – Изменение суммарного содержания хлорофиллов

в листьях «здоровых» (ЗД) и «ослабленных» (ОД) деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение вегетационного периода в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра.

Примечание. Пунктиром обозначены линии тренда

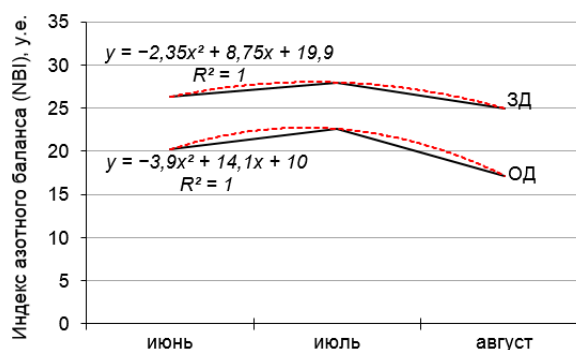


Рисунок 4 – Изменение индекса азотного баланса (NBI)

в листьях «здоровых» (ЗД) и «ослабленных» (ОД) деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в течение вегетационного периода в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра.

Примечание. Пунктиром обозначены линии тренда

Достоверных различий индекса азотного баланса в сформированных листьях у «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя не обнаружено. В конце вегетационного периода наблюдалось уменьшение содержания хлорофиллов и снижение индекса азотного баланса в листьях как «здоровых», так и «ослабленных» деревьев тополя.

Заключение

В целом древостой тополя бальзамического в насаждениях санитарно-защитной зоны СПЦ относится к категории «ослабленный». Внешние признаки угнетения проявляются в уменьшении густоты кроны, увеличении количества мертвых ветвей, поражении ассимиляционного аппарата хлорозами и некрозами. Насаждения выполняют средозащитные и средостабилизирующие функции в части поглощения промышленных загрязнителей [2].

Получены данные о количественном содержании хлорофиллов ($a + b$) адаксиальной и абаксиальной сторон полностью сформированных листьев у «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического в условиях полиметаллического загрязнения. Показано, что среднее содержание хлорофиллов в листьях «здоровых» деревьев тополя варьировало в пределах от 25,0 до 28,0 мкг/см² сырой массы, в то время как у «ослабленных» деревьев было сравнительно низким и составляло 17,2–22,6 мкг/см² сырой массы. Снижение суммарного содержания хлорофиллов и ухудшение относительного жизненного состояния деревьев взаимосвязаны.

Установлено, что в период активного роста листьев (в июне и начале июля) высокое содержание хлорофиллов и индекса азотного баланса (NBI) отмечается в листьях как «здоровых», так и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического. Взаимосвязь рассматриваемых показателей подтверждается уравнениями регрессии полиномиальной функции, а также достаточно высокими коэффициентами детерминации. Максимальные различия по соотношению содержания хлорофиллов ($a + b$) и азотного баланса (NBI) в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя отмечены в конце августа.

Показано, что в течение вегетационного периода в листьях «ослабленных» деревьев по сравнению с листьями «здоровых» деревьев тополя наблюдается снижение значений NBI и содержание хлорофиллов. При этом существенных изменений в содержании хлорофиллов адаксиальной и абаксиальной сторон листьев «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического в течение вегетации не наблюдается.

Список литературы:

1. Горчаковский П.Л., Шурова Е.А., Князев М.С. и др. Определитель сосудистых растений Среднего Урала. М.: Наука, 1994. 525 с.
2. Кулагин А.Ю., Гиниятуллин Р.Х., Уразгильдин Р.В. Средостабилизирующая роль лесных насаждений в условиях Стерлитамакского промышленного центра. Уфа: Гилем, 2010. 108 с.
3. Гарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // Физиология растений. 1980. Т. 27, вып. 2. С. 341–348.

4. Иванов Л.А., Иванова Л.А., Ронжина Д.А., Юдина П.К. Изменение содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях степных растений вдоль широтного градиента на Южном Урале // Физиология растений. 2013. Т. 60, № 6. С. 856–864. DOI: 10.7868/S0015330313050072.
5. Młodzińska E. Survey of plant pigments: molecular and environmental determinants of plant colors // Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica. 2009. Vol. 51 (1). P. 7–16.
6. Tran T.A., Popova L.P. Functions and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects // Turkish Journal of Botany. 2013. Vol. 37. P. 1–13. DOI: 10.3906/bot-1112-16.
7. Кириенко Н.Н., Терлеева П.С. Влияние техногенного загрязнения территории на содержание фотосинтетических пигментов в листьях лекарственных растений // Проблемы современной аграрной науки: мат-лы междунар. заоч. науч. конф. Красноярск: КрасГАУ, 2009. С. 50–54.
8. Kvičala M., Lacková E., Urbancová L. Photosynthetic active pigments changes in Norway spruce (*Picea abies*) under the different acclimation irradiation and elevated CO₂ content // International Scholarly Research Notices. 2014. Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/572576.
9. Major J.E., Barsi D.C., Mosseler A., Campbell M. Genetic variation and control of chloroplast pigment concentrations in *Picea rubens*, *Picea mariana* and their hybrids. I. Ambient and elevated [CO₂] environments // Tree Physiology. 2007. Vol. 27 (3). P. 353–364. DOI: 10.1093/treephys/27.3.353.
10. Муратова А.Ю., Любунь Е.В., Сунгурцева И.Ю., Нуржанова А.А., Турковская О.В. Физиолого-биохимические реакции *Miscanthus × giganteus* на загрязнение почвы тяжелыми металлами // Экобиотех. 2019. Т. 2, № 4. С. 482–493.
11. Кадильникова И.П., Тайчинов С.И. Условия почвообразования на территории Башкирии и его провинциальные черты // Почвы Башкирии. Т. 1. Уфа: БФ АН СССР, 1973. С. 15–62.
12. Зейферт Д.В., Бикбулатов И.Х., Рудаков К.М., Григорьева И.Н. Растительные сообщества и почвенная мезофауна территорий химических предприятий в степной зоне Башкирского Предуралья / под ред. Б.М. Миркина. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. 166 с.
13. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.
14. Cartelat A., Cerovic Z.G., Goulasa Y. et al. Opticaly assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) // Field Crops Research. 2005. Vol. 91, iss. 1. P. 35–49. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.05.002.
15. Гиниятуллин Р.Х., Емшина Е.А., Файрузов И.И. Содержание и особенности распределения марганца, никеля в органах у здоровых и ослабленных деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Экобиотех. 2020. Т. 3, № 3. С. 488–496.
16. Тарабрин В.П., Кондратюк Е.Н., Башкатов В.Г. и др. Фитотоксичность органических и неорганических загрязнителей. Киев: Наук. думка, 1986. 216 с.
17. Куркаев В.Т., Шейджен А.Х. Агрехимия. Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2000. 552 с.
18. Шейджен А.Х. Биогехимия. Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2003. 1028 с.
19. Croft H., Chen J.M. Leaf pigment content // Comprehensive Remote Sensing / S. Liang (ed.). Oxford: Elsevier, 2018. P. 117–142. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10547-0.

Исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Агидель» в рамках выполнения плановых исследований по бюджетной теме Рег. № НИОКТР АААА-А18-118022190103-01 и при поддержке гранта Министерства образования и науки Республики Башкортостан НОЦ-РМГ-2021 «Создание методологических основ оценки баланса парниковых газов и определения потенциала депонирования углерода в экосистемах».

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<p>Гиниятуллин Рафак Хизбуллинович, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории лесоведения; Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа, Российская Федерация). E-mail: grafak2012@yandex.ru.</p> <p>Иванов Руслан Сергеевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологии растений; Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа, Российская Федерация). E-mail: ivanovirs@mail.ru.</p> <p>Тагирова Олеся Васильевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии, географии и природопользования; Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы (г. Уфа, Российская Федерация); научный сотрудник лаборатории лесоведения; Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа, Российская Федерация). E-mail: olecyi@mail.ru.</p> <p>Кулагин Алексей Юрьевич, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией лесоведения; Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа, Российская Федерация); ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем; Уфимский государственный нефтяной технический университет (г. Уфа, Российская Федерация). E-mail: coolagin@list.ru.</p>	<p>Giniyatullin Rafak Khizbullinovich, doctor of agricultural sciences, senior researcher of Forest Science Laboratory; Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: grafak2012@yandex.ru.</p> <p>Ivanov Ruslan Sergeevich, candidate of biological sciences, senior researcher of Plant Physiology Laboratory; Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: ivanovirs@mail.ru.</p> <p>Tagirova Olesya Vasilyevna, candidate of biological sciences, associate professor of Ecology, Geography and Natural Resource Management Department; Aknulla Bashkir State Pedagogical University (Ufa, Russian Federation); researcher of Forest Science Laboratory; Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: olecyi@mail.ru.</p> <p>Kulagin Aleksey Yuryevich, doctor of biological sciences, professor, Head of Forest Science Laboratory; Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation); leading researcher of Monitoring Climate Change and Carbon Balance of Ecosystems Laboratory; Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation). E-mail: coolagin@list.ru.</p>

Для цитирования:

Гиниятуллин Р.Х., Иванов Р.С., Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), произрастающих в условиях промышленного загрязнения (Республика Башкортостан, Стерлитамакский промышленный центр) // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 1. С. 43–48. DOI: 10.55355/snv2022111104.