

## Содержание фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в условиях техногенного загрязнения г. Риддера

### The content of photosynthetic pigments in the spruce needles under the conditions of technogenic pollution of Ridder

Соколова Г. Г., Корниенко В. И., Кондратьева И. А.

Sokolova G. G., Korniyenko V. I., Kondrateva I. A.

Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия. E-mails: sokolova-gg@mail.ru; Lera\_2520@mail.ru; ira\_kondrateva\_1997@mail.ru, Altai State University, Barnaul, Russia

**Реферат.** В статье рассмотрены результаты биохимических исследований содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в хвое ели обыкновенной, произрастающей в разных условиях города Риддера: контроль, парки, дороги, цинковый завод и ТЭЦ. Техногенное загрязнение воздушного бассейна г. Риддера приводит к изменению содержания хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов в хвое ели обыкновенной. Выявлено достоверное уменьшение содержания хлорофилла *b* и каротиноидов в хвое ели в следующем ряду мест произрастания: контроль → парки → дороги → цинковый завод → ТЭЦ. В динамике по возрастам во всех местах произрастания елей выявлено небольшое увеличение концентрации хлорофиллов и каротиноидов.

**Ключевые слова.** Каротиноиды, техногенное загрязнение, хвоя ели, хлорофиллы.

**Summary.** The article discusses the results of biochemical studies of the content of chlorophylls *a*, *b* and carotenoids in the spruce needles growing in different conditions of the city of Ridder: control, parks, roads, zinc plant and CHP. Technogenic pollution of the Ridder air basin leads to the change in the content of chlorophylls *a* and *b*, carotenoids in the coniferous spruce. A significant decrease in the content of chlorophyll *b* and carotenoids in spruce needles was revealed in the following row of growing places: control → parks → roads → zinc plant → CHP. In the dynamics by age, a slight increase in the concentration of chlorophylls and carotenoids was revealed in all places of growth of fir trees.

**Key words.** Carotenoids, chlorophylls, spruce needles, technogenic pollution.

**Введение.** В современном мире городские экосистемы подвергаются сильному антропогенному воздействию, которое связано с загрязнением окружающей среды. В связи с этим возникает необходимость оценки состояния качества среды, которую необходимо проводить по реакциям растительных организмов на условия произрастания. По мере увеличения загрязнения у растения начинают проявляться внутренние нарушения, связанные с угнетением фотосинтетического аппарата (Донцов и др., 2016).

Содержание пигментов – это один из параметров оценки функционального состояния хвойных пород в условиях урбоэкосистем. Фотосинтетический аппарат растений достаточно чувствителен к внешним воздействиям, так как находится под постоянным воздействием факторов окружающей среды (Старикова, Воскресенская, 2020). Состав пигментов в растении – информативный и широко используемый показатель, определяющий работу фотосинтетического аппарата растений. Главными фоторецепторами фотосинтезирующей клетки являются хлорофиллы (*a*, *b*) и каротиноиды (Титова, 2010).

Вещества, загрязняющие атмосферный воздух, могут снизить количество фотосинтезирующих пигментов и изменить структуру мембран хлоропластов, вследствие чего происходит отрицательное воздействие на фотосинтез. Основными действующими факторами снижения деятельности фотосинтетического аппарата являются пыль и сажа в воздухе (Бухарина, Пашкова, 2015).

Влияние газообразных токсикантов на пигменты разнообразно и зависит от концентрации загрязнителей (Собчак, 2009; Тужилкина, 2009; Титова, 2013). В ситуации сильного воздействия поллютантов наблюдается уменьшение содержания фотосинтетических пигментов, причем хлорофилл *b* и каротиноиды более чувствительны к промышленным выбросам, чем хлорофилл типа *a* (Николаевский, 1999).

Изучение влияния загрязняющих веществ на состояние ели обыкновенной в г. Риддере играет большое практическое значение, т. к. в городе функционирует 3 предприятия горнодобывающей и перерабатывающей промышленности (Тишинский, Риддер-Сокольный, Долинный рудники), обогащательная фабрика, цинковый завод, ряд вспомогательных подразделений и цехов, а также предприятие АО «Риддер-ТЭЦ». Данные предприятия построены в зоне наиболее густой речной сети, поэтому выбросы газообразных, жидких и твердых веществ неизбежно попадают в реки и почву, что наносит непоправимый вред экосистеме города (Козыбаева, Саркулова, 2017). Основными загрязнителями рек, в которые сбрасываются промышленные отходы, являются Cu, Mn и Zn (Хантурина и др., 2015). Превышения нормативов максимально-разовых ПДК в атмосферном воздухе города отмечаются по сероводороду, диоксиду серы, оксиду серы, оксиду азота и фенолу, причем превышения ПДК диоксида серы и сероводорода наблюдаются ежегодно за последние 4 года.

Целью наших исследований явилось изучение динамики содержания фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в условиях техногенного загрязнения г. Риддера.

**Объекты и методы исследований.** В качестве объекта исследования была выбрана ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) Н. Karst.). На территории города Риддера (Восточно-Казахстанская область, Казахстан) выделено 14 пробных площадок в различных районах, которые при дальнейшем анализе были разделены на группы в связи с разной степенью загрязнения: контрольный участок, парки, дороги, цинковый завод и ТЭЦ. В качестве контроля взята условно чистая территория в отдаленном районе города. С каждого дерева в нижней части кроны отбиралась хвоя первого, второго, третьего и четвертого года жизни (Пургина и др., 2007). В каждой точке отобрано не менее 400 хвоинок, всего проанализировано 5600 хвоинок разного возраста.

Для оценки изменения биохимического состава хвои использовались следующие параметры: содержание хлорофилла *a*, содержание хлорофилла *b*, соотношение хлорофиллов *a* и *b*, содержание каротиноидов, общее содержание пигментов. Биохимический анализ определения содержания фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной определяли спектрофотометрическим методом в трёхкратной повторности. Для работы использовался спектрофотометр марки SHIMADZU UV-1800. Спектр поглощения фотосинтетических пигментов определялся на следующих длинах волн: 662 нм – для хлорофилла *a*, 644 нм – для хлорофилла *b*, 440,5 – для каротиноидов. Концентрации пигментов в листьях рассчитывались по формулам Хольма-Веттштейна (Рогожин, 2013). Достоверность различий между вариантами определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента ( $p < 0,05$ ) (Лакин, 1990).

#### Результаты и обсуждение.

**Хлорофилл *a*.** Анализ содержания хлорофилла *a* в хвое елей обыкновенных, произрастающих на контрольном участке, выявил следующие закономерности. В динамике по возрастам достоверных отклонений не обнаружено, концентрация хлорофилла *a* варьировала от 28 мг/л до 29 мг/л (табл. 1).

Таблица 1

Содержание хлорофилла *a* в хвое растений ели обыкновенной в г. Риддере

Места отбора проб	Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/л			
	1 год	2 год	3 год	4 год
Контроль	28,51 ± 0,3	28,98 ± 0,08	28,92 ± 0,18	27,97 ± 0,08
Парки	27,64 ± 1,44	27,99 ± 0,27	27,83 ± 0,91	26,88 ± 1,18
Вдоль дорог	<b>15,75 ± 1,75</b>	<b>23,38 ± 1,48</b>	<b>24,47 ± 1,58</b>	<b>26,89 ± 0,81</b>
Цинковый завод	28,76 ± 0,31	<b>26,68 ± 1,40</b>	<b>26,18 ± 1,06</b>	28,07 ± 1,86
ТЭЦ	<b>20,71 ± 0,04</b>	<b>27,56 ± 0,87</b>	<b>25,99 ± 1,59</b>	<b>27,38 ± 0,17</b>

Примеч.: **15,75 ± 1,75** – значение достоверно при  $p \leq 0,05$ .

В хвое елей, растущих в парках, достоверных отличий в содержании хлорофилла *a* по сравнению с контролем не выявлено. Содержание хлорофилла *a* в хвое первого года жизни у елей, растущих вдоль дорог, снижено по отношению с контролем на 45 %; в хвое второго года – на 19 %; в хвое третьего года – на 15 %, в хвое четвертого года – на 4 %. В динамике по возрастам прослеживается увеличение пигментов от 16 мг/л до 27 мг/л.

В хвое елей, растущих около цинкового завода, содержание хлорофилла *a* варьировало от 26 мг/л до 29 мг/л. Достоверное снижение содержания хлорофилла *a* на 8–9 % по сравнению с контролем характерно только для хвои второго и третьего годов жизни.

Содержание хлорофилла *a* в хвое елей, растущих в районе ТЭЦ, колебалось от 21 мг/л до 27 мг/л. Достоверное уменьшение содержания хлорофилла *a* на 3 % по сравнению с контролем выявлено для хвои второго–четвертого годов жизни, в хвое первого года жизни содержание хлорофилла снижено на 27 %.

Полученные результаты исследований подтверждают мнение других исследователей о том, что хлорофилл *a* менее чувствителен к воздействию загрязнителей (Старикова, Воскресенская, 2020).

**Хлорофилл *b*.** Содержание хлорофилла *b* в хвое елей, растущих на контрольном участке, варьировало от 54 мг/л до 55 мг/л. В динамике по возрастам не отмечено значительных изменений содержания данного пигмента. Содержание хлорофилла *b* в хвое елей, растущих в парках города, изменялось от 52 мг/л до 53 мг/л. Достоверных изменений его содержания по сравнению с контролем не обнаружено (табл. 2).

Таблица 2

Содержание хлорофилла *b* в хвое растений ели обыкновенной в г. Риддере

Точки отбора проб	Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/л			
	1 год	2 год	3 год	4 год
Контроль	55,39 ± 0,07	55,07 ± 0,14	55,07 ± 0,34	53,72 ± 0,12
Парки	52,07 ± 1,61	52,83 ± 1,22	<b>52,02 ± 1,34</b>	51,82 ± 1,42
Вдоль дорог	<b>26,38 ± 1,81</b>	<b>40,65 ± 1,71</b>	<b>45,29 ± 1,69</b>	<b>47,91 ± 1,57</b>
Цинковый завод	<b>40,27 ± 1,67</b>	<b>43,02 ± 1,10</b>	<b>43,38 ± 1,81</b>	<b>47,80 ± 1,21</b>
ТЭЦ	<b>33,55 ± 0,06</b>	<b>42,41 ± 0,54</b>	<b>40,57 ± 1,52</b>	<b>47,04 ± 0,08</b>

Примеч.: **26,38 ± 1,81** – значение достоверно при  $p \leq 0,05$ .

Анализ содержания хлорофилла *b* в хвое елей, растущих вдоль дорог, показал достоверное снижение данного пигмента относительно контроля. В хвое первого года отмечено уменьшение содержания данного пигмента на 52 %; в хвое второго года – на 26 %, в хвое третьего года – на 21 %, в хвое четвертого года – на 11 %. В динамике по возрастам прослеживается увеличение концентрации хлорофилла *b* с 26 до 48 мг/л.

Анализ содержания хлорофилла *b* в хвое елей, растущих около цинкового завода, выявил достоверное его снижение по сравнению с контролем: в хвое первого года – на 27 %, в хвое второго года – на 22 %, в хвое третьего года – на 21 %, в хвое четвертого года – на 11 %. В динамике по возрастам отмечено увеличение содержания хлорофилла *b* с 40 до 48 мг/л.

Анализ содержания хлорофилла *b* в хвое елей, растущих в районе ТЭЦ, показал достоверное снижение его концентрации в хвое первого года – на 39 %, в хвое второго года – на 23 %, в хвое третьего года – на 26 %, в хвое четвертого года – на 12 %. В динамике по возрастам выявлено достоверное увеличение содержания данного пигмента с 34 до 47 мг/л.

Таким образом, с увеличением техногенной нагрузки количество хлорофилла *b* закономерно снижается по сравнению с контролем, причем наибольшее уменьшение содержания хлорофилла *b* отмечено в хвое елей, растущих в районе ТЭЦ и около цинкового завода. Анализ содержания хлорофилла *b* по возрастам показал, что его содержание увеличивается.

**Сумма хлорофиллов *a* и *b*.** Сумма хлорофиллов в хвое елей, растущих в контрольной точке, отличалась стабильностью (82–64 мг/л) и уменьшается только в хвое четвертого года в среднем на 2 мг/л (табл. 3). Содержание суммы хлорофиллов в хвое елей, растущих в парках, ниже контроля на 3,6–4,9 % (табл. 3). В динамике по возрастам содержание суммы пигментов варьирует от 78,7 мг/л до 80,82 мг/л.

Анализ суммы хлорофиллов в хвое елей, произрастающих вдоль дорог, имеет следующие закономерности. В динамике по возрастам прослеживается увеличение содержания пигментов, количество их варьирует от 42,13 мг/л до 74,80 мг/л. Такое увеличение происходит за счет увеличения содержания хлорофилла *b*. В хвое елей первого года общее содержание хлорофиллов значительно ниже контроля на 49,7 %, в хвое второго года – на 23,8%; в хвое третьего года – на 16,9%, в хвое четвертого года – на 8,4 % (табл. 3).

Таблица 3

Общее содержание хлорофиллов *a* и *b* в хвое елей в г. Риддере ( $C_a + C_b$ )

Места отбора проб	$C_a + C_b$ (мг/л)			
	1 год	2 год	3 год	4 год
Контроль	83,90	84,04	83,99	81,69
Парки	<b>79,71</b>	<b>80,82</b>	<b>79,85</b>	<b>78,70</b>
Вдоль дорог	<b>42,13</b>	<b>64,03</b>	<b>69,76</b>	<b>74,80</b>
Цинковый завод	<b>69,03</b>	<b>69,70</b>	<b>69,56</b>	<b>75,87</b>
ТЭЦ	<b>54,26</b>	<b>69,97</b>	<b>66,56</b>	<b>74,42</b>

Примеч.: **54,26** – значение достоверно при  $p \leq 0,05$ .

Общее содержание хлорофиллов в хвое елей, растущих около цинкового завода, варьирует от 69 мг/л до 76 мг/л. Наблюдается увеличение количества пигментов в хвое по возрастам. Анализ содержания суммы хлорофиллов выявил ее снижение по сравнению с контролем в хвое первого года – на 18 %, в хвое второго года – на 17%, в хвое третьего года – на 17 %, в хвое четвертого года – на 7 % (табл. 3).

Анализ суммы хлорофиллов в хвое елей, растущих около ТЭЦ, показал, что наибольшее уменьшение содержания хлорофиллов характерно для хвои первого года во всех точках произрастания, наименьшее снижение – для хвои четвертого года во всех точках произрастания. В динамике по возрастам выявлено увеличение концентрации хлорофиллов.

**Отношение хлорофиллов *a/b*.** Отношение хлорофиллов *a/b* в контрольной точке имеет стабильные значения в хвое разных лет жизни. В парках достоверных отличий по данному параметру не наблюдается (табл. 4).

Таблица 4

Отношение хлорофиллов *a/b* в хвое растений ели обыкновенной в г. Риддере

Места отбора проб	$C_a / C_b$ (мг/л)			
	1 год	2 год	3 год	4 год
Контроль	0,52	0,53	0,53	0,52
Парки	0,53	0,53	0,54	0,52
Вдоль дорог	<b>0,58</b>	<b>0,58</b>	<b>0,54</b>	<b>0,56</b>
Цинковый завод	<b>0,72</b>	<b>0,62</b>	<b>0,61</b>	<b>0,59</b>
ТЭЦ	<b>0,62</b>	<b>0,65</b>	<b>0,64</b>	<b>0,58</b>

Примеч.: **0,62** – значение достоверно при  $p \leq 0,05$ .

Анализ отношения хлорофилла *a/b*, в хвое елей, растущих вдоль дорог, показал, что этот показатель увеличивается по сравнению с контролем во всех возрастных группах хвои на 2–11 %. Отношение хлорофилла *a/b* в хвое елей, растущих в районе цинкового завода, повышается относительно контроля по всем возрастам на 13–38 %; в хвое елей, растущих около ТЭЦ, – на 11–22 %.

**Каротиноиды.** Содержание каротиноидов в хвое елей, растущих на контрольном участке, варьировало от 256 мг/л до 267 мг/л, отмечена тенденция уменьшения их содержания по возрастным группам хвои (табл. 5).

Таблица 5

Содержание каротиноидов в хвое растений ели обыкновенной в г. Риддере

Места отбора проб	Содержание каротиноидов, мг/л			
	1 год	2 год	3 год	4 год
Контроль	267,26 ± 2,06	259,93 ± 0,81	260,02 ± 2,25	256,37 ± 0,45
Парки	<b>243,48 ± 3,06</b>	<b>247,96 ± 4,33</b>	<b>242,18 ± 3,24</b>	255,22 ± 2,19
Дороги	<b>181,41 ± 2,41</b>	<b>219,09 ± 2,49</b>	<b>220,79 ± 2,63</b>	<b>231,74 ± 1,99</b>

Продолжение табл. 5

Места отбора проб	Содержание каротиноидов, мг/л			
	1 год	2 год	3 год	4 год
Цинковый завод	207,98 ± 3,59	194,89 ± 3,12	177,89 ± 4,52	164,35 ± 2,07
ТЭЦ	130,48 ± 0,32	168,62 ± 4,51	149,74 ± 3,78	144,37 ± 2,66

Примеч.: 243,48 ± 3,06 – значение достоверно при  $p \leq 0,05$ .

Анализ содержания каротиноидов в хвое ели показал, что происходит закономерное достоверное снижение их содержания во всех точках произрастания: в парках – на 6–9 %, около дорог – на 9–32 %, в районе цинкового завода – на 22–36 %, в районе ТЭЦ – на 35–43 %. В динамике по возрастам отмечается колебания содержания каротиноидов.

Таким образом, содержание каротиноидов значительно снижается по мере увеличения антропогенной нагрузки. Анализ содержания каротиноидов в хвое елей показал значительные достоверные снижения в хвое елей, растущих около ТЭЦ – на 35,3–51,0 % и в хвое елей, растущих около цинкового завода – на 22,1–36,2 %. Менее значительные изменения отмечены в хвое елей, растущих вдоль дорог, содержание каротиноидов снизилось на 9,6–32,1 %. В пробах елей, растущих в парках, содержание каротиноидов достоверно изменялось у хвои елей первого года жизни – на 8,9 % и третьего года жизни – на 6,8 %, в хвое елей второго и четвертого годов жизни достоверных изменений не отмечено.

В условиях техногенного загрязнения в большей степени изменялась концентрация хлорофилла *b* и каротиноидов, содержание хлорофилла *a* изменялся в меньшей степени; достоверное его уменьшение отмечено только в районе ТЭЦ и цинкового завода. Следовательно, хлорофилл *b* более чувствителен к промышленному загрязнению среды, чем хлорофилл *a*, что подтверждают результаты исследований других авторов (Донцов и др., 2016).

Количественное содержание каротиноидов достоверно снижается по мере увеличения техногенного загрязнения, т. к. действие промышленных газов провоцирует их разрушение (Чеснокова, 2007). Чувствительность фотосинтетического аппарата елей повышается при поглощении выбросов токсических веществ, в особенности соединений серы и оксида углерода, что приводит к нарушению световой и темновой фаз фотосинтеза, воздействуя на пигменты – хлорофиллы и каротиноиды, а также на активность ферментов и некоторые другие процессы (Нобл, Такемото, 1982).

#### Выводы.

1. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в г. Риддере зависит от места произрастания и интенсивности техногенной нагрузки, закономерно снижаясь в ряду парки → дороги → цинковый завод → ТЭЦ.

2. Максимальное снижение содержания хлорофилла *b* и каротиноидов отмечено в хвое елей, растущих в районе ТЭЦ и цинкового завода. В динамике по возрастным группам хвои выявлена тенденция увеличения содержания хлорофилла *b* и каротиноидов.

3. Отношения хлорофилла *a/b* в хвое елей, увеличивается по сравнению с контролем во всех возрастных группах хвои и во всех местах произрастания.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бухарина И. Л., Паикова А. С.* Особенности динамики фотосинтетических пигментов у хвойных растений в насаждениях города // Вестник Ижевской гос. с.-х. академии, 2015. – № 1(42). – С. 27–33.
- Донцов А. С., Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М.* Оценка состояния окружающей среды города Красноярск по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореальной зоны, 2016. – № 5–6. – С. 246–250.
- Козыбаева Ф. Е., Саркулова Ж.* Влияние горно-металлургических предприятий города Риддера на окружающую среду // Почвоведение и агрохимия, 2017. – № 3. – С. 49–56.
- Лакин Г. Ф.* Биометрия // Критерии достоверности оценок: параметрические критерии. – М.: Высш. шк., 1990. – С. 113–124.
- Николаевский В. С.* Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. – М.: МГУЛ, 1999. – 193 с.
- Нобл Р. Д., Такемото Б. К.* Влияние двуокиси серы на фотосинтез // Взаимодействие лесных экосистем и атмосферных загрязнителей, 1982. – Ч. 2. – С. 9–25.
- Пургина Л. А., Фирсов А. Н., Плотникова О. В., Кулик И. В.* Биоиндикация в охране окружающей среды. – Снежинск, 2007 – 143 с.

**Рогожин В. В.** Практикум по биохимии. – СПб.: Лань, 2013. – С. 344–356.

**Собчак Р. О.** Диагностика состояния видов хвойных в зонах техногенного загрязнения Республики Алтай // Вестник Томского государственного университета, 2009. – № 325. – С. 185–190.

**Старикова Е. А., Воскресенская О. Л.** Сезонная динамика содержания фотосинтетических пигментов у хвойных растений в условиях городской среды // Известия высших учебных заведений, 2020. – № 2(30). – С. 32–42.

**Титова М. С.** Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies*, *Picea koraiensis* // Вестник Оренбургского гос. ун-та, 2010. – № 12–1(118). – С. 9–12.

**Титова М. С.** Реакция пигментной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на загрязнение окружающей среды // Вестник КрасГАУ, 2013. – № 10. – С. 122–126.

**Тужилкина В. В.** Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение // Экология, 2009. – № 4. – С. 243–248.

**Хантурина Г. Р., Ибраева Л. К., Сейткасымова Г. Ж., Бахлуев А. В.** Особенности загрязнения воздушного бассейна г. Риддер Восточно-Казахстанской области распространенными поллютантами // Медицина и экология, 2015. – № 3. – С. 51–53.

**Чеснокова С. М.** Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды // Методы индикации загрязнения воздуха. – Владимир: изд-во Владимирского гос. ун-та, 2007. – С. 17–19.