УДК 581.19(571.150-25) DOI: 10.14258/pbssm.2026065

Динамика содержания фотосинтетических пигментов в листьях травянистых растений под влиянием техногенного загрязнения в условиях г. Барнаула

Dynamics of the content of photosynthetic pigments in the leaves of herbaceous plants under the influence of technogenic pollution in the city of Barnaul

Соколова Г. Г., Кондратьева И. А.

Sokolova G. G., Kondratyeva I. A.

Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия. E-mail: sokolova-gg@mail.ru, kondratevaia@bio.asu.ru
Altai State University, Barnaul, Russia

Реферат. В статье приводятся результаты исследования содержания фотосинтетических пигментов в листьях 5 видов травянистых растений *Plantago major* L., *Plantago media* L., *Trifolium pratense* L., *Trifolium repens* L. и *Taraxacum officinale* L. в условиях техногенного загрязнения г. Барнаула. Выявлены закономерности изменения содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов. Установлены достоверные различия в содержании фотосинтетических пигментов в листьях травянистых растений, растущих в парках и скверах, вдоль автодорог, около ТЭЦ и по берегам рек. Зафиксировано снижение содержания хлорофиллов у всех видов растений при увеличении техногенного загрязнения.

Ключевые слова. Техногенное загрязнение, фотосинтетические пигменты, *Plantago major, Plantago media, Trifolium pratense, Trifolium repens*, *Taraxacum officinale*.

Summary. The article presents the study results of the content of photosynthetic pigments in 5 species of herbaceous plants: *Plantago major* L., *Plantago media* L., *Trifolium pratense* L., *Trifolium repens* L. and *Taraxacum officinale* L. under conditions of technogenic pollution in Barnaul. The patterns of changes in the content of chlorophyll *a*, chlorophyll *b* and carotenoids have been identified. Significant differences in the content of photosynthetic pigments in the leaves of herbaceous plants growing in parks, along roads, near thermal power plants, and along river banks have been established. A decrease in the content of chlorophylls has been recorded with an increase in anthropogenic pollution.

Key words. Photosynthetic pigments, technogenic pollution, *Plantago major, Plantago media, Trifolium pratense, Trifolium repens*, *Taraxacum officinale*.

Введение. Растения, произрастающие в городской среде, могут служить чувствительными индикаторами, с помощью которых можно оценить уровень техногенного загрязнения и его влияние на биохимический состав. Хлорофиллы и каротиноиды играют ключевую роль в фундаментальном биологическом процессе – фотосинтезе. Они отвечают за поглощение, передачу и преобразование световой энергии. Изменения количественного и качественного состава пигментов являются чувствительным индикатором физиологического состояния растений и их фотосинтетического аппарата, а также степени их адаптации в условиях стресса (Петров и др., 2016).

Многие исследования подтверждают важное значение изучения пигментного состава растений как диагностического индикатора устойчивости растений к различным факторам как в экстремальных условиях обитания, так и в условиях городской среды (Алиев, 1993; Головко и др., 2007). Изучение состояния пигментной системы листьев актуально в целях установления нормирования и прогнозирования антропогенных нагрузок в условиях антропогенного воздействия.

Содержание пигментов является показателем потенциальной фотосинтетической способности растений. Именно поэтому изменение их содержания при разных уровнях загрязнения воздуха характеризует степень депрессии фотосинтеза. Фотосинтетические характеристики пигментного комплекса могут рассматриваться как некоторый индикатор степени устойчивости, а также общего состояния растений (Майдебура, 2006; Бухарина и др., 2013).

Растения не обладают системой адаптации к токсичным газам, и поэтому их поступление и накопление в тканях нарушают функциональную деятельность и структуру растительного организма, в первую очередь ассимиляционного аппарата (Бухарина и др., 2013).

Антропогенное загрязнение природной среды вызывает серьезные нарушения в пигментном комплексе растений. Под воздействием автотранспортного загрязнения содержание пигментов падает (Удовенко, 1995; Ху и др., 2007; Кириенко, Терлеева, 2009; Ерофеева и др., 2009). Следует отметить, что суммарное содержание пигментов в листьях растений, произрастающих в местах наиболее интенсивного загрязнения, ниже по сравнению с растениями, произрастающими вдали от дорог и промышленных предприятий (Максимова и др., 2007). Помимо уменьшения общего количества пигментов техногенное загрязнение приводит к изменению соотношения пигментов в листьях. В норме соотношение хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов находится в следующей закономерности: хлорофилла *a* более 50 %, хлорофилла *b* – около 30 % и каротиноидов – менее 20 % (Максимова и др., 2007). Именно такое соотношение является оптимальным, обеспечивая наиболее эффективную работу фотосинтетического аппарата.

Выявлено отрицательное влияние газообразных токсикантов на пигменты. Большинство этих веществ после поглощения их клетками локализуются в хлоропластах, вызывая угнетение или даже полное прекращение фотосинтеза, свободное фотодинамическое окисление и разрушение клеточных структур. Растения не обладают системой адаптации к вредным газам, и поэтому их поступление и накопление в тканях нарушают функциональную деятельность и структуру растительного организма, в первую очередь ассимиляционного аппарата (Бухарина и др. 2013).

В Барнауле источниками загрязнения воздушного бассейна на современном этапе являются в основном ТЭЦ и автомобильный транспорт. Травянистые растения могут служить биоиндикаторами качества окружающей среды в городских экосистемах.

Цель нашей работы – оценка содержания фотосинтетических пигментов в листьях травянистых растений (*Plantago major* L., *Plantago media* L., *Trifolium pratense* L., *Trifolium repens* L., *Taraxacum officinale* L.) под влиянием техногенного загрязнения в условиях г. Барнаула.

Материалы и методы исследования. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Алтайского края уровень загрязнения воздуха в г. Барнауле характеризуется как высокий. Веществами, определяющими уровень загрязнения атмосферы города, являются оксид и диоксид азота, оксид углерода, бензапирен, формальдегид, диоксид серы, взвешенные вещества. Автотранспорт, выступая основным источником загрязнения на автомагистралях, является источником выброса оксида углерода, оксида и диоксида азота, тяжелых металлов и диоксида серы, которые в час пик часто превышают допустимую норму.

Материалом для исследования служили листья 5 видов травянистых растений – подорожника большого *Plantago major* L., подорожника среднего *Plantago media* L., клевера лугового *Trifolium pratense* L., клевера ползучего *Trifolium repens* L., одуванчика лекарственного *Taraxacum officinale* L., собранных в период вегетации и цветения в различных точках г. Барнаула в течение 2022–2024 гг. Сбор листьев проводился в сухую погоду, выбрались одновозрастные растения с листьями одинаковой размерности. С одной точки собиралось 30–50 листьев. Все точки сбора растительного материала сгруппированы по сходным местам обитания: берега р. Обь и р. Барнаулки, парки и скверы, автодороги, ТЭЦ. В качестве контроля была выбрана территория Южно-Сибирского ботанического сада Алтайского государственного университета.

Биохимический анализ содержания фотосинтетических пигментов в растениях проводился с помощью спектрофотометра марки SHIMADZU UV–1800 с измерением максимумов поглощения пигментов на длинах волн: 662 нм – хлорофилл *a*, 644 нм – хлорофилл *b*, 440,5 нм – каротиноиды. Измерения проводили в трехкратной биологической и аналитической повторностях. Статистическая обработка данных проводилась в программе Microsoft Office Excel.

Результаты и их обсуждение.

Подорожник средний. По сравнению с контролем содержание хлорофилла *a* в листьях подорожника среднего изменялось в сторону уменьшения в ряду местообитаний: парки → берега р. Оби и р. Барнаулки → автодороги → ТЭЦ. Наименьшее содержание хлорофилла *a* выявлено в листьях подорожника среднего, растущего около ТЭЦ и вдоль автодорог (на 25 и на 21 % соответственно). Содержание хлорофилла *a* в листьях подорожника, растущего в парках и скверах, отличалось по сравнению с контролем на 10 % (табл. 1).

Таблица 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях подорожников, мг/100 г воздушно-сухого веса

Места сбора	Подорожник большой			Подорожник средний		
	1	2	3	1	2	3
Контроль	86,73±0,15	43,37±0,41	29,84±0,23	79,25±0,84	43,12±0,94	29,84±0,90
Парки и скверы	72,10±3,21	38,67±0,78	28,56±1,15	71,15±0,09	41,01±2,34	29,98±0,71
Берега рек	71,73±3,34	40,35±1,43	31,77±0,05	69,04±1,61	44,28±0,98	31,81±0,04
Автодороги	68,10±1,01	38,46±1,21	33,35±1,01	63,15±1,10	43,48±1,58	32,99±0,16
ТЭЦ	61,89±0,23	43,01±0,51	33,38±0,35	59,73±0,51	41,05±0,78	33,37±0,90

Примеч.: 1 – хлорофилл *a*, 2 – хлорофилл *b*, 3 – каротиноиды.

Содержание хлорофилла *b* достоверно не отличалось от контроля у подорожника среднего, растущего в парках и скверах, на берегу р. Оби и р. Барнаулки, вдоль автодорог. Достоверное уменьшение содержания хлорофилла *b* отмечено только у подорожника среднего, растущего около ТЭЦ (табл. 1).

Достоверное увеличение каротиноидов по сравнению с контролем в листьях подорожника среднего наблюдалось в ряду: берега р. Оби и р. Барнаулки → автодороги → ТЭЦ. Увеличение содержания каротиноидов по сравнению с контролем составило 6%, 10% и 11% соответственно. В парках достоверного изменения содержания каротиноидов не выявлено (табл. 1).

Подорожник большой. По сравнению с контролем содержание хлорофилла *a* в листьях подорожника большого достоверно изменялось в сторону уменьшения в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → парки → автодороги → ЭЦ. Наименьшее содержание хлорофилла выявлено в листьях подорожника среднего, растущего около ТЭЦ и вдоль автодорог (на 29 и 22 % соответственно).

Содержание хлорофилла *a* в листьях подорожника, растущего вдоль берегов р. Оби и р. Барнаулки, отличалось по сравнению с контролем на 17 % (табл. 1). Достоверное уменьшение по сравнению с контролем выявлено в листьях подорожника большого, растущего вдоль автодорог и вдоль берега р. Оби и р. Барнаулки, на 12 %. В парках и скверах отмечено достоверное увеличение содержания хлорофилла *b* по сравнению с контролем на 7 %. Достоверных изменений его содержания в листьях подорожника большого, растущего возле ТЭЦ, не выявлено (табл. 1).

Достоверное увеличение каротиноидов отмечалось в ряду парки → автодороги → ТЭЦ. Достоверных изменений содержания каротиноидов в листьях подорожника большого, растущих вдоль берегов р. Оби и р. Барнаулки, по сравнению с контролем не выявлено (табл. 1).

Клевер луговой. По сравнению с контролем содержание хлорофилла *a* в листьях клевера лугового достоверно изменялось в сторону уменьшения в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → парки → ТЭЦ → автодороги. Наименьшее содержание хлорофилла *a* выявлено в листьях клевера лугового, растущего вдоль автодорог и около ТЭЦ (на 14 % и 12 % соответственно). Содержание хлорофилла *a* в листьях клевера лугового, растущего в парках, отличалось по сравнению с контролем на 6 % (табл. 2).

Содержание хлорофилла *b* в листьях клевера лугового достоверно уменьшалось по сравнению с контролем в ряду ТЭЦ → Берега р. Оби и р. Барнаулки → автодороги (на 7 %, 18 % и 20 % соответственно). Достоверных изменений содержания хлорофилла *b* в листьях клевера лугового, произрастающего в парках, не выявлено (табл. 2).

Достоверное увеличение каротиноидов по сравнению с контролем обнаружено в листьях клевера лугового, произрастающего около ТЭЦ (на 9 %). Достоверное снижение каротиноидов отмечается вдоль берега р.Оби и р. Барнаулки и автодорог (на 15 % и 19 % соответственно). В парках достоверного изменения содержания каротиноидов не выявлено (табл. 2).

Клевер ползучий. По сравнению с контролем содержание хлорофилла *a* в листьях клевера ползучего достоверно изменялось в сторону уменьшения в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → автодороги → ТЭЦ. Достоверного изменения содержания хлорофилла *a* в листьях клевера ползучего, растущего в парках, не выявлено. Наименьшее содержание хлорофилла *a* выявлено в листьях клевера ползучего, растущего около ТЭЦ и вдоль автодорог (на 10 % и 17 % соответственно).

Содержание хлорофилла *a* в листьях клевера ползучего, растущего вдоль берега р. Оби и р. Барнаулки, отличалось по сравнению с контролем на 9 % (табл. 2).

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях клеверов, мг/100 г воздушно-сухого веса

Места сбора	Клевер луговой			Клевер ползучий		
	1	2	3	1	2	3
Контроль	86,39±0,29	52,92±0,31	39,90±0,36	79,72±0,37	49,68±0,24	33,18±0,25
Парки и скверы	82,90±2,08	43,76±2,21	43,84±0,34	80,42±1,40	48,56±1,65	34,64±0,32
Берега рек	81,99±3,89	50,93±1,84	37,30±1,78	74,92±2,18	38,72±0,98	32,99±1,08
Автодороги	76,32±0,45	49,29±0,27	33,85±0,81	72,15±2,51	44,24±0,92	32,76±1,44
ТЭЦ	74,13±0,85	42,19±0,92	31,56±1,29	69,70±0,48	45,81±0,21	30,98±0,32

Примеч.: 1 – хлорофилл *a*, 2 – хлорофилл *b*, 3 – каротиноиды.

Достоверное уменьшение содержания хлорофилла *b* в листьях клевера ползучего отмечено в ряду местообитаний: ТЭЦ → автодороги → берега р. Оби и р. Барнаулки (на 8 %, 11 % и 22 % соответственно). Достоверных изменений содержания хлорофилла *b* в листьях клевера ползучего, растущего в парках и скверах, не выявлено. (табл. 2).

Достоверное снижение каротиноидов в листьях клевера ползучего выявлено вдоль автодорог на 7 %, возле ТЭЦ – на 4 %. У клевера, растущего вдоль берега р. Оби и р. Барнаулки, а также в парках, достоверных изменений содержания каротиноидов в листьях клевера ползучего выявлено не было (табл. 2).

Одуванчик лекарственный. По сравнению с контролем содержание хлорофилла *a* в листьях одуванчика лекарственного достоверно изменялось в сторону уменьшения в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → парки → автодороги → ТЭЦ. Наименьшее содержание хлорофилла выявлено в листьях одуванчика обыкновенного, растущего около автодорог и ТЭЦ (на 18 % и 29 % соответственно). Содержание хлорофилла *a* в листьях одуванчика, растущего вдоль берега р. Оби и р. Барнаулки, отличалось по сравнению с контролем на 6 % (табл. 3).

Таблица 3. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях одуванчика лекарственного, мг/100 г воздушно-сухого веса

Места сбора	Одуванчик лекарственный		
	1	2	3
Контроль	92,54 ± 0,59	59,37 ± 0,54	41,25 ± 0,34
Парки и скверы	87,02 ± 3,84	54,36 ± 1,35	39,26 ± 0,48
Берега рек	83,53 ± 1,47	52,23 ± 2,58	37,92 ± 2,13
Автодороги	76,76 ± 0,64	51,37 ± 0,79	37,58 ± 1,27
ТЭЦ	65,43 ± 0,32	41,93 ± 0,16	37,20 ± 1,06

Примеч.: 1 – хлорофилл *a*, 2 – хлорофилл *b*, 3 – каротиноиды.

Достоверное уменьшение содержания хлорофилла *b* в листьях одуванчика лекарственного отмечено в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → парки → автодороги → ТЭЦ. Отмечается снижение хлорофилла *b* в листьях одуванчика лекарственного, растущего вдоль берега р. Оби и р. Барнаулки, на 8%. Снижение хлорофилла *b* по сравнению с контролем в листьях одуванчика лекарственного, растущего около ТЭЦ, составляет 29% (табл. 3).

Достоверное уменьшение каротиноидов по сравнению с контролем в листьях одуванчика лекарственного наблюдалось в ряду: ТЭЦ → парки → автодороги → берега р. Оби и р. Барнаулки. Содержание каротиноидов в листьях одуванчика лекарственного, произрастающего вдоль ТЭЦ, достоверно

снижается по сравнению с контролем на 5 %. Максимальное снижение каротиноидов отмечено в листьях одуванчика лекарственного, растущего вдоль берега р. Оби и р. Барнаулки, на 10 % (табл. 3).

Выводы.

1. Общее содержание хлорофиллов у подорожников обоих видов достоверно снижается по сравнению с контролем на 8–20 % за счет уменьшения концентрации хлорофилла *a* в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → парки → автодороги → ТЭЦ. Содержание каротиноидов в аналогичном ряду местообитаний достоверно увеличивается на 6–11 % по мере возрастания техногенной нагрузки.

2. Содержание хлорофиллов в листьях клеверов обоих видов достоверно снижается по сравнению с контролем за счет уменьшения концентрации как хлорофилла *a,* так и хлорофилла *b*, на 9–20 % в ряду местообитаний: парки → берега р. Оби и р. Барнаулки → ТЭЦ → автодороги. Содержание каротиноидов достоверно увеличивается по сравнению с контролем у клеверов, растущих около ТЭЦ, на 4–9 %.

3. Общее содержание хлорофиллов у одуванчика лекарственного достоверно снижается по сравнению с контролем на 6–29 % за счет уменьшения концентрации как хлорофилла *a,* так и хлорофилла *b*, в ряду местообитаний: берега р. Оби и р. Барнаулки → парки → автодороги → ТЭЦ. Содержание каротиноидов достоверно уменьшается по сравнению с контролем на 5–10 %.

ЛИТЕРАТУРА

Алиев М. Г. Ярусная изменчивость содержания хлорофилла и продолжительность жизни у листьев травянистых растений // Вестник Дагестанского гос. университета. Серия 1: Естественные науки, 2006. – № 1. – С. 99–102.

Бухарина И. Л., Кузьмин П. А., Гибадулина И. И. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) // Вестник Удмуртского государственного университета. Серия биология. Науки о Земле, 2013. – № 1. – С. 20–25.

Головко Т. К., Дымова О. В., Табаленкова Г. Н. Пигментный аппарат растений Приполярного Урала // Ботан. журн., 2007. – Т. 92, № 11. – С. 1732–1741. https://doi.org/10.1134/S0015330319030035

Ерофеева Е. А., Сухов В. С., Наумова М. М. Двухфазная зависимость некоторых эколого–морфологических и биохимических параметров листовой пластинки березы повислой от уровня автотранспортного загрязнения // Поволжский экологический журнал, 2009. – № 4. – С. 288–295.

Кириенко Н. Н., Терлеева П. С. Влияние техногенного загрязнения территории на содержание фотосинтетических пигментов в листьях лекарственных растений // Проблемы современной аграрной науки. – Красноярск: КрасГАУ, 2009. – С. 50–54.

Майдебура И. С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомо–морфологические и биохимические показатели древесных растений: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Калининград, 2006. – 22 с.

Максимова Е. В., Косицина А. А., Макурина О. Н. Влияние антропогенных факторов химической природы на некоторые эколого–биохимические характеристики растений // Вестник СамГУ. Естественно-научная серия, 2007. – № 8 (58). – С. 146–152

Петров К. А., Софронова В. Е., Чепалов В. А., Перк А. А., Максимов Т. Х. Сезонные изменения содержания фотосинтетических пигментов у многолетних травянистых растений криолитозоны (Якутия) // Физиология растений, 2010. – Т. 57, № 2. – С. 192–199.

Удовенко Г. В. Устойчивость растений к абиотическим стрессам // Физиологические основы селекции растений. Ч. II. – Санкт–Петербург: ВИР, 1995. – С. 293–352.

Ху Ц. Ц., Ши Г. С., Су Ц. С., Ван С., Юан Ц. Х., Ду К. Х. Воздействие Pb2+ на активность антиоксидантных ферментов и ультраструктуру клеток листьев // Физиология растений, 2007. – Т. 54. – № 3. – С. 469–474.