

Динамика содержания пигментов в листьях клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) в условиях города Барнаула

The dynamics of pigments content in the leaves of *Acer negundo* L. in urban conditions of Barnaul

Соколова Г. Г.

Sokolova G. G.

Алтайский государственный университет, г Барнаул, Россия. E-mail: sokolova-gg@mail.ru

Altai State University, Barnaul, Russia

Реферат. В статье рассмотрены результаты исследования динамики содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды) в листьях клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) в условиях г. Барнаула. Высокий уровень загрязнения вызывает ответную реакцию растений, проявляющуюся в виде снижения количества хлорофилла *a* и *b*, изменения соотношения хлорофиллов *a/b*. В качестве защитного механизма от разрушения молекул хлорофилла *a* и органических веществ при загрязнении атмосферного воздуха выступают каротиноиды. В условиях городских экосистем их количество увеличивается в течение вегетационного сезона.

Ключевые слова. Листья клена, каротиноиды, техногенное загрязнение, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*.

Summary. The article discusses the results of the study of dynamics of photosynthetic pigments content (chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids) in the leaves of *Acer negundo* L. in Barnaul. High contamination level causes a plant response, manifested in decreasing in amount of chlorophyll *a* and *b* and a changing in the chlorophyll *a/b* ratio. Carotenoids during atmospheric air pollution act as a protective mechanism against the destruction of chlorophyll *a* molecules and organic substances. In urban ecosystems, their number increases during the growing season.

Key words. Chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids, technogenic pollution, the leaves of *Acer negundo*.

Введение. В настоящее время исследования урбоэкосистем достаточно актуальны, так как города становятся основной средой обитания человека. В последние десятилетия наблюдается интенсивное загрязнение атмосферы городов газообразными выбросами автотранспорта и промышленных предприятий, что создает угрозу здоровью населения. Наличие и количество растений в экосистеме города является наиболее существенным фактором нейтрализации газообразных токсикантов (Николаевский, 1979; Тищенко, 2013). Древесные растения в городах выполняют средообразующую и санитарно-защитную функции, а их листовые органы способствуют улавливанию и детоксикации пылевидных частиц и газообразных веществ (Соловьева, 2001; Соколова, Калгина, 2019).

В условиях городских экосистем растения подвергаются негативному воздействию загрязняющих веществ, что приводит к нарушению функционального состояния растений. Действие поллютантов проявляется у разных растений, прежде всего, в изменении биохимического состава, в том числе пигментного комплекса (Алиева, 2014; Ростунов, Кончина, 2016). Изменение содержания пигментов приводит к потере биологической продуктивности, к снижению роста растений (Андрианов, Тарчевский, 2000; Павлов, 2005; Чупахина, 2014).

Атмосферное загрязнение внешней среды является фактором, к которому растения эволюционно не приспособлены, они не адаптированы к воздействию вредных газов, большинство растений накапливают в органах токсиканты, которые, проникая в органы и ткани, оказывают влияние на обмен веществ клеток, вступая в химические взаимодействия на уровне мембран клеток (Бриттон, 1986; Максимова, 2007; Чупахина, 2014). Накопление в растительных тканях токсинов нарушает структуру

и функции ассимиляционного аппарата, чувствительного к действию антропогенных факторов (Бухарина и др., 2013).

Основными пигментами, участвующими в фотосинтезе высших растений, являются хлорофиллы. Кроме того, в растениях присутствуют каротиноиды, которые помимо участия в процессах фотосинтеза обеспечивают окраску цветков и плодов. Содержание фотосинтетических пигментов в растениях зависит от общего физиологического состояния растений, особенностей светового режима, продолжительности действия токсикантов, химического состава загрязняющих веществ и их совокупного воздействия. Высокое содержание хлорофилла *a* и *b*, величина соотношения хлорофилла *a/b* могут служить признаком благоприятных условий произрастания растений. На техногенно загрязненных территориях в листьях растений увеличивается количество каротиноидов, которые защищают молекулы хлорофилла от разрушения и снижают эффект стресса (Кайгородов, 2010; Чупахина, 2014; Рябухина И ДР., 2015).

Для экологической оценки воздушной среды городов используются биоиндикационные методы, позволяющие охарактеризовать стабильность развития растений как адаптацию к различным уровням загрязнения (Опекунова, 2004; Павлов, 2005; Хван, 2012; Кутафина, Краснопивцева, 2017). Стабильность развития растения как способность организма к развитию без нарушений является индикаторным признаком. Наиболее доступным для широкого использования способами оценки стабильности развития являются оценка морфологических признаков и динамики содержания фотосинтетических пигментов (Неверова, 2001; Ерофеева, Шаповалова, 2015).

К основным источникам загрязнения воздуха в Барнауле относятся автотранспорт и теплоэлектростанции. В атмосферном воздухе города преобладают пыль, сажа, диоксид азота, формальдегид, пыль, бензапирен и другие вещества. Эти соединения в первую очередь отрицательно влияют на пигментный состав, разрушают хлорофилл *a*, изменяют соотношение основных и дополнительных фотосинтетических пигментов растений (Скочилова, Закамская, 2013; Соколова, Богтова, 2019).

Клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) – двудомное, ветроопыляемое листопадное дерево, достигающее в высоту 20 м с широкой и раскидистой кроной. Кора от светло-коричневого до буро-коричневого цвета с мелкими трещинами и бороздами. Ствол короткий, у основания сильно разветвленный. Листья сложные, непарноперистые, черешковые, супротивные, состоящие из 3–5 (реже 7–11) листочков, по краям пильчатых или лопастных. Мужские цветы собраны в свисающие пучки, пыльники окрашены в красноватый цвет. Женские соцветия зеленого цвета, соцветие – кисть. Плод – крылатка (Костина и др., 2013).

Растения хорошо переносят высокую загазованность воздуха, морозостойкие, светолюбивые, предпочитает влажные, дренированные почвы. Клен ясенелистный является древесным интродуцентом, активно расселяется по всей территории России. По экологическим, экономическим и медицинским негативным последствиям он занимает первое место из 50 инвазионных видов-чужестранцев, вытесняя местные виды, осваивая разнообразные местообитания, вызывая аллергические реакции на пыльцу, образуя не несущие рекреационной ценности заросли, ингибируя развитие травяного покрова (Костина и др., 2013).

Целью нашей работы явилось изучение динамики содержания фотосинтезирующих пигментов в листьях клена ясенелистного, растущего на перекрестках и вдоль автодорог в г. Барнауле.

Материалы и методы. Для оценки динамики содержания фотосинтетических пигментов в листьях клена ясенелистного, растущего в условиях техногенного загрязнения на территории города Барнаула, было заложено 9 пробных площадок, расположенных на крупных автомагистралях и перекрестках автодорог: ул. Малахова – ул. Юрина, ул. Малахова – ул. Петрова, ул. Малахова – Павловский тракт, пр. Красноармейский – ул. Партизанская, пр. Красноармейский – ул. Молодежная, пр. Ленина – ул. Дмитрова, пр. Ленина – ул. Пролетарская, пр. Ленина – пр. Строителей, пр. Строителей – пр. Социалистический. В качестве контроля служили листья клена ясенелистного, растущего в районе Южно-Сибирского ботанического сада.

На каждой пробной площадке выбиралось 10 деревьев, растущих на открытом месте, чтобы избежать стрессового влияния затенения. Листья в количестве 50–100 шт. отбирались с деревьев одного

возраста и высоты из нижней части кроны на уровне 1,5–2,0 м над поверхностью земли в летний период времени в середине дня, когда содержание пигментов в листьях наибольшее. Собранный растительный материал высушивался до воздушно-сухого веса.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях клена оценивалось на спектрофотометре марки SHIMADZU UV-1800. Измерения максимумов поглощения пигментов проводились в трехкратной повторности на длине волн фотосинтетических пигментов: 662 нм – хлорофилл *a*, 644 нм – хлорофилл *b*, 440,5 нм – каротиноиды. Концентрации пигментов в листьях клена рассчитывались в два этапа по формулам (Гулиев и др., 2009; Рогожин, 2013):

1 этап. Расчет концентрации пигментов листьев в спиртовом растворе (мг/л):

$$C_a = 9,784D_{662} - 0,99D_{644},$$

$$C_b = 21,426 D_{644} - 4,650D_{662},$$

$$C_a + C_b = 5,134D_{662} + 20,436D_{644},$$

$$C_k = 4,695D_{440,5} - 9,268(C_a - C_b),$$

где D_{662} , D_{644} и $D_{440,5}$ – оптическая плотность при длинах волн 662, 644, 440,5 нм соответственно; C_a , C_b , C_k – концентрация хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в листьях объектов исследования (мг/л).

2 этап. Расчет количества пигментов в пробе (мг/100 г):

$$C_o = C \cdot V \cdot V2 / m \cdot V1 \cdot 10,$$

где C – концентрация пигмента, мг/л; V – объем исходной вытяжки, мл; $V1$ – объем вытяжки, взятой для разбавления, мл; $V2$ – объем разбавленной вытяжки, мл; m – масса навески.

Полученные данные обработаны статистически с использованием *t*-критерия Стьюдента (Лякин, 1990).

Результаты и обсуждение. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях кленов, произрастающих вдоль крупных автомагистралей и на перекрестках автодорог г. Барнаула, выявил следующие закономерности их динамики.

Хлорофилл *a*. Содержание хлорофилла *a* в листьях кленов, растущих на контрольном участке, изменялось от 4,92 до 5,57 мг/100 г, причем значительных колебаний концентрации данного пигмента на протяжении летних месяцев не отмечалось (табл. 1).

Таблица 1

Динамика содержания хлорофилла *a* в листьях кленов, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	5,25 ± 0,02	5,57 ± 0,02	4,92 ± 0,01
пр. Строителей – пр. Социалистический	3,26 ± 0,07	2,38 ± 0,09	1,79 ± 0,07
ул. Малахова – ул. Юрина	2,53 ± 0,10	2,67 ± 0,04	1,87 ± 0,04
пр. Красноармейский – ул. Партизанская	2,51 ± 0,03	2,60 ± 0,03	1,94 ± 0,07
пр. Ленина – ул. Димитрова	2,51 ± 0,01	2,67 ± 0,04	1,95 ± 0,07
пр. Ленина – ул. Пролетарская	2,48 ± 0,02	2,53 ± 0,05	1,89 ± 0,01
пр. Красноармейский – ул. Молодежная	2,43 ± 0,01	2,54 ± 0,06	2,01 ± 0,08
ул. Малахова – ул. Петрова	2,45 ± 0,09	2,57 ± 0,06	1,92 ± 0,01
пр. Ленина – пр. Строителей	2,37 ± 0,01	2,49 ± 0,03	1,87 ± 0,08
ул. Малахова – Павловский тракт	2,24 ± 0,09	2,37 ± 0,06	1,76 ± 0,06
Среднее	2,42	2,54	1,89

Примеч.: 2,53 ± 0,10 – значение достоверно при $p < 0,05$.

Содержание хлорофилла *a* в листьях кленов, произрастающих на перекрестках и вдоль автомагистралей, варьировало от 1,76 до 3,26 мг/100 г, что достоверно ниже по сравнению с контролем в июне на 38–57 %, в июле – на 58–88 %, в августе – на 59–64 %. Отмечено слабое колебание концентрации хлорофилла *a* в листьях кленов в течение вегетационного периода: в июле незначительное повышение, а в августе – снижение.

Наиболее неблагоприятные условия произрастания для кленов складываются в районе ул. Малахова – Павловский тракт, пр. Ленина – пр. Строителей, т. к. здесь отмечается высокая интенсивность движения автомобилей и, соответственно, высокий уровень загазованности.

Хлорофилл *b*. Содержание хлорофилла *b* в листьях кленов, растущих на контрольном участке, менялось от 2,40 до 2,94 мг/100 г, резких колебаний концентрации пигмента в течение лета отмечено не было (табл. 2).

В листьях кленов, произрастающих на перекрестках и вдоль крупных автодорог, содержание хлорофилла *b* составило от 1,80 до 2,39 мг/100 г, что достоверно ниже в сравнении с контролем в июне – на 19–27 %, в июле – на 19–28 %, в августе – на 16–25 % (табл. 2). В динамике по месяцам во всех точках наблюдения в листьях кленов отмечается тенденция небольшого увеличения содержания хлорофилла *b* в июле и снижения содержания хлорофилла *b* в августе.

Таблица 2

Динамика содержания хлорофилла *b* в листьях кленов, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	2,81 ± 0,03	2,94 ± 0,01	2,40 ± 0,02
пр. Ленина – ул. Димитрова	2,27 ± 0,06	2,36 ± 0,08	1,94 ± 0,08
ул. Малахова – ул. Юрина	2,25 ± 0,03	2,39 ± 0,04	2,02 ± 0,08
ул. Малахова – Павловский тракт	2,19 ± 0,05	2,23 ± 0,09	1,89 ± 0,01
пр. Ленина – ул. Пролетарская	2,19 ± 0,06	2,25 ± 0,03	1,83 ± 0,08
пр. Красноармейский – ул. Молодежная	2,18 ± 0,08	2,29 ± 0,01	1,99 ± 0,04
ул. Малахова – ул. Петрова	2,15 ± 0,09	2,29 ± 0,02	1,92 ± 0,04
пр. Ленина – пр. Строителей	2,14 ± 0,03	2,21 ± 0,07	1,80 ± 0,02
пр. Красноармейский – ул. Партизанская	2,13 ± 0,07	2,28 ± 0,08	1,94 ± 0,08
пр. Строителей – пр. Социалистический	2,06 ± 0,06	2,17 ± 0,09	1,84 ± 0,06
Среднее	2,17	2,27	1,91

Примеч.: **2,25 ± 0,03** – значение достоверно при $p < 0,05$.

Наименьшее содержание хлорофилла *b* характерно для листьев кленов, произрастающих в районе автовокзала. Наибольшее содержание хлорофилла *b* выявлено в листьях кленов, растущих в районе пр. Строителей – пр. Социалистический.

Соотношение хлорофиллов *a/b*. Результаты анализа показали, что в листьях кленов, растущих на контрольном участке, наблюдается увеличения соотношения хлорофиллов *a/b* в течение июня–августа.

Соотношение хлорофиллов *a/b* в листьях кленов, произрастающих на перекрестках и вдоль автодорог, достоверно снижается по сравнению с контролем в июне – на 12–46 %, в июле – на 40–54 %, в августе – на 50–50 % (табл. 3). Более низкие показатели отношения хлорофиллов *a/b* характерны для листья кленов, произрастающих на перекрестке ул. Малахова – Павловский тракт.

Каротиноиды. Содержание каротиноидов в листьях кленов, растущих на контрольном участке, изменялось в течение вегетационного сезона 1,63 до 1,70 мг/100 г, незначительно увеличиваясь в течение вегетационного периода (табл. 4).

Таблица 3

Отношение хлорофиллов *a/b* в листьях кленов, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Отношение хлорофиллов <i>a/b</i>		
	июнь	июль	август
Контроль	1,87	1,89	2,05
пр. Красноармейский – ул. Партизанская	1,65	1,14	1,00
пр. Строителей – пр. Социалистический	1,58	1,10	0,97
ул. Малахова – ул. Петрова	1,14	1,12	1,00
пр. Ленина – ул. Пролетарская	1,13	1,12	1,03
ул. Малахова – ул. Юрина	1,12	1,12	0,93
пр. Красноармейский – ул. Молодежная	1,11	1,11	1,01
пр. Ленина – ул. Димитрова	1,11	1,13	1,01
пр. Ленина – пр. Строителей	1,11	1,13	1,04
ул. Малахова – Павловский тракт	1,02	1,06	0,93
Среднее	1,22	1,11	0,99

Таблица 4

Динамика содержания каротиноидов в листьях кленов, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках в г. Барнауле

Точка отбора проб	Содержание каротиноидов, мг/100 г		
	июнь	июль	август
Контроль	1,63 ± 0,01	1,65 ± 0,01	1,70 ± 0,02
Пр. Красноармейский – ул. Молодежная	1,09 ± 0,07	1,13 ± 0,07	1,78 ± 0,06
Ул. Малахова – ул. Юрина	1,02 ± 0,01	1,11 ± 0,01	1,69 ± 0,02
Пр. Ленина – ул. Пролетарская	0,95 ± 0,06	1,12 ± 0,06	1,81 ± 0,03
Павловский тракт – ул. Малахова	0,95 ± 0,02	1,05 ± 0,05	1,99 ± 0,01
Ул. Петрова – ул. Малахова	0,93 ± 0,01	1,04 ± 0,07	1,98 ± 0,01
Пр. Ленина – пр. Строителей	0,85 ± 0,02	0,98 ± 0,04	1,81 ± 0,06
Пр. Красноармейский – ул. Партизанская	0,81 ± 0,04	0,93 ± 0,01	1,96 ± 0,03
Среднее	0,94	1,05	1,87

Примеч.: **1,02 ± 0,01** – значение достоверно при $p < 0,05$.

Содержание каротиноидов в листьях кленов, произрастающих вдоль автодорог и на перекрестках, варьировало от 0,82 до 1,95 мг/100 г, что достоверно ниже по сравнению с контролем в июне – на 33–48 %, в июле – на 32–44 %, в августе – на 0–16 % (табл. 4). В динамике по месяцам выявлено увеличение содержания каротиноидов во всех точках наблюдений.

Таким образом, анализ содержания групп фотосинтетических пигментов в листьях кленов, растущих вдоль крупных автодорог и на перекрестках в г. Барнауле, показал, что в условиях техногенного загрязнения содержание хлорофиллов *a* и *b* достоверно снижается по сравнению с контрольными участками на 38–88 % и 16–28 % соответственно. Высокий уровень загрязняющих веществ приводит к снижению накопления и деструкции фотосинтетических пигментов, причем в большей степени повреждается хлорофилл *a*.

Анализ соотношения хлорофиллов *a/b* в листьях кленов как показателя потенциальной фотохимической активности листьев и высокой потенциальной интенсивности процессов фотосинтеза выявил снижение данного показателя по сравнению с контролем на 12–54 % и увеличение его во всех точках наблюдений в течение вегетационного периода, что свидетельствует о нарушении проницаемости мембран хлоропластов, увеличении скорости проникновения токсикантов в клетки растений и нарушении ультраструктуры тканей листа.

Однако следует отметить, что в участках города, отличающихся большим загрязнением воздуха, содержание каротиноидов повышено, что говорит о защитных механизмах, которые направлены на снижение губительного воздействия загрязнения и защиты молекулы хлорофилла *a* и органических веществ от деструкции. Этот пигмент частично берет на себя функции основного пигмента, компенсируя недостаток хлорофилла *a* (Бриттон, 1986).

Увеличение содержания каротиноидов в листьях кленов, растущих на перекрестках и вдоль автоторог, в течение июня-августа, является следствием стрессовой реакции растений и активацией защитных механизмов, направленных на снижение токсичного воздействия загрязнения. Каротиноиды в условиях техногенного загрязнения компенсируют недостаток основного пигмента – хлорофилла *a*, что подтверждается и литературными данными (Калверт, 2006).

ЛИТЕРАТУРА

- Алиева М. Ю.** Изучение параметров флуоресценции хлорофилла древесных растений в условиях различной транспортной нагрузки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – № 1. – С. 701–703.
- Андреанова Ю. Е., Тарчевский И. А.** Хлорофилл и продуктивность растений // Наука, 2000. – № 3. – С. 50–62.
- Бриттон Г.** Биохимия природных пигментов: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 422 с.
- Бухарина П. А., Кузьмин П. А., Гибадулина И. И.** Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) // Ботанические исследования, 2013. – Вып. 1. – С. 20–25.
- Гулиев Р. Б., Азизов Б. М., Аббасаде А. А.** Оценка содержания хлорофилла в растениях, подвернутых антропогенному воздействию, спектрофотометрическим методом // Оптика и спектроскопия, 2009. – Т. 106. – № 3. – С. 514–520.
- Ерофеева Е. А., Шановалова К. В.** Многолетний сравнительный анализ устойчивости *Betula pendula* (Betulaceae, Fagales) и *Tilia cordata* (Malvaceae, Malvales) к автотранспортному загрязнению // Поволжский экологический журнал, 2015. – № 4. – С. 390–399.
- Кайгородов Р. В.** Устойчивость растений к химическому загрязнению. – Пермь, 2010. – 151 с.
- Калверт Т. М.** Эколого-физиологические особенности адаптации древесных растений к условиям крупных промышленных центров // Лесоведение, 2006. – № 7. – С. 34–36.
- Костина М. В., Минькова Н. О., Ясинская О. И.** О биологии клена ясенелистного в зеленых насаждениях Москвы // Российский журнал биологических инвазий, 2013. – № 4. – С. 32–43.
- Кутафина Н. В., Краснопищева А. Н.** Физиологические основы адаптации растительных организмов в условиях урбанизированной среды // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2017. – Т. 25. № 1. – С. 21–28. DOI: 10.22363/2313-2310-2017-25-1-21-28
- Лакин Г. Ф.** Биометрия. – М.: Высшая школа, 1990. – С. 350–352.
- Максимова Е. В.** Влияние антропогенных факторов химической природы на некоторые эколого-биохимические характеристики растений // Вестник СамГУ, 2007. – № 8. – С. 146–152.
- Неверова О. А.** Биоэкологическая оценка загрязнения атмосферного воздуха по состоянию древесных растений. – Новосибирск: Наука, 2001. – 119 с.
- Николаевский В. С.** Биологические основы газоустойчивости растений // Наука, 1979. – № 5. – С. 22–28.
- Опекунова М. Г.** Биоиндикация загрязнений. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 265 с.
- Павлов И. Н.** Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2005. – 370 с.
- Рогожин В. В.** Практикум по биохимии. – СПб.: Лань, 2013. – С. 344–356.
- Ростунов А. А., Кончина Т. А.** Влияние техногенных загрязнений на физиологические показатели листьев древесных растений на примере г. Арзамаса // Известия Иркутского государственного университета, 2016. – Т. 15. – С. 68–79.
- Рябухина М. В., Филиппова А. В., Белопухов С. Л., Федорова Т. А.** Мониторинг дендрофлоры городской среды методом оценки биохимических маркерных показателей // Вестник РУДН, серия Агрономия и животноводство, 2015. – № 1. – С. 12–17.
- Саловарова В. П., Приставка А. А., Берсенева О. А.** Введение в биохимическую экологию. – Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. – 159 с.
- Скочилова Е. А., Закамская Е. С.** Изучение биохимических показателей *Betula pendula* Roth. в условиях городской среды // Известия Самарского научного центра РАН, 2013. – № 3. – С. 782–784.

Соколова Г. Г., Богатова В. А. Динамика содержания хлорофиллов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.), произрастающей в парках города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2019. – № 18. – С. 531–534. DOI: 10.14258/pbssm.2019112.

Соколова Г. Г., Калгина М. В. Динамика содержания пигментов в листья тополя черного (*Populus nigra* L.), растущего около автодорог в г. Бийске // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2019. – № 18. – С. 535–539. DOI: 10.14258/pbssm.2019113.

Соловьева Н. В. Растения в техногенной среде // Минск: Наука и техника, 2001. – № 7. – С. 206–211.

Тищенко Ю. З. Древесные растения и промышленная среда // Наука, 2013. – № 21. – С. 126.

Хван В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации // Физиология растений, 2012. – № 16. – С. 23–27.

Чупахина Г. Н. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2014. – № 2. – С. 181–185.