

Цветометрические и спектральные характеристики листьев *Caragana arborescens* и *Elaeagnus angustifolia* как потенциальных индикаторов антропогенного воздействия

Кулик К. Н.^{1,2}, Исаков А. С.¹, Новочадов В. В.²

¹ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН
Волгоград, Россия

² Волгоградский государственный университет
Волгоград, Россия

kulikk@vfanc.ru, isakov-a@vfanc.ru, novochadov.valeriy@volsu.ru

Актуальность обусловлена появлением новых систем получения и компьютерного анализа цифровых изображений и спектрограмм биологических объектов, что значительно повысило возможности фитоиндикации и расширило число видов-биоиндикаторов на засушливых территориях. В качестве объектов выбраны кустарники *Caragana arborescens* и *Elaeagnus angustifolia*, широко используемые на юго-востоке Европейской России для рекультивации антропогенных ландшафтов и широко применяемые в защитном лесоразведении. Материал был получен с участков с низким и высоким уровнем антропогенного загрязнения, которое выражалось в повышенном содержании токсичных микроэлементов в почве и загрязнении воздуха. При анализе цветометрических показателей наибольшие различия зарегистрированы для продольного и поперечного градиентов интенсивности зеленого в формате RGB в листьях исследованных видов. При спектрометрии интенсивность светопоглощения на длине волны A_{664} оказалась чувствительной в отношении уровня антропогенной нагрузки для выбранных растений. Определение концентрации суммарного хлорофилла, флавоноидов, антоцианов и индекса азотного баланса в листовых пластинках спектрометром «Dualox Scientific+» отчетливо выявляло различия величин показателей между выбранными биологическими видами и их произрастанием на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки. Сопоставление результатов между видами, а также между участками с различной степенью и характером антропогенной нагрузки позволило заключить, что оба подхода в настоящий момент могут эффективно использоваться в комплексе с классическими методами биоиндикации. Достаточно высокая чувствительность *E. angustifolia* и *C. arborescens* к изменениям загрязнения окружающей среды позволяет рекомендовать этот вид в качестве растения-биоиндикатора в условиях засушливой зоны.

Ключевые слова: листовая пластинка, компьютерная цветометрия, спектральный анализ, *Caragana arborescens*, *Elaeagnus angustifolia*, биоиндикация, антропогенные загрязнения.

ВВЕДЕНИЕ

Современная биология и экология в полной мере оказались вовлеченными в глобальный процесс цифровизации научных исследований, одним из проявлений которой стало принципиальное изменение способов получения, хранения, количественной обработки и воспроизведения цветовых характеристик биологических объектов – от субклеточных структур до растительных сообществ. Все это привело к выделению в биологических науках самостоятельной прикладной дисциплины – компьютерной цветометрии (Черноусова и др., 2019; Ракутько и др., 2022).

Листовые пластинки растений являются весьма динамичными объектами, активно реагирующими на изменения состояния растения. Эти изменения могут фиксироваться для отдельных растений или для их сообществ, являясь высокоинформативным компонентом биоиндикации состояния окружающей среды (Ляшенко, 2019; Протасова и др., 2019). Форма листовой пластинки позволяет использовать техники получения 2D изображений практически без пространственных искажений, что незаменимо в полевых исследованиях и при динамическом анализе больших выборок растений (Широкий, Новочадов, 2022).

Применительно к фитоиндикации, специалисты по биомониторингу получили возможность для бесконтактного количественного анализа с помощью высокочувствительных и малозатратных количественных методов, характеризующих

состояние растительных объектов в динамике и on-line режиме (Турмухаметова, 2019; Zaghoul et al., 2020).

Решение задачи получения подобной информации привело к созданию достаточного количества портативных специализированных приборов, которые выдают пользователю результат в виде «фактического» содержания биологических веществ (прежде всего – пигментов) в объекте, не раскрывая детали определения. Предпринимаемые в настоящее время попытки использовать цветовую информацию формата RGB как источник сведений о содержании пигментов в различных частях растений (Катаев, Дадонова, 2019; Zhang et al., 2022) также требуют отдельных исследований и обсуждений.

На сегодняшний день в России в качестве биоиндикаторов используется большое число видов многолетних древесных растений, преимущественно представителей родов *Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Padus*, *Populus*, *Titia*, *Ulmus* (Ляшенко, 2019; Краснаярова и др., 2024). В отношении засушливых территорий этот перечень гораздо уже, использование большинства классических биоиндикаторов ввиду суровых климатических и почвенных условий здесь ограничено или принципиально невозможно. Необходимы растения с высокой степенью адаптации к засушливым условиям, но исследования в этом направлении немногочисленны (Протасова и др., 2019; Zhou et al., 2024).

Цель работы – оценить возможности компьютерной цветометрии и спектрального анализа листовых пластинок *Elaeagnus angustifolia* L. и *Caragana arborescens* Lam. в комплексе исследования адаптации растений к условиям существования и биоиндикации неблагоприятного антропогенного воздействия на экосистемы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве объекта выбраны листовые пластинки лоха узколистного, *E. angustifolia*, типичного аборигенного представителя дендрофлоры Волгоградской области, и караганы древовидной, *C. arborescens*, интродуцированной на эту территорию из Сибири и успешно адаптировавшейся к новым условиям существования (рис. 1).

Оба вида ранее уже описывались как претенденты на роль биоиндикаторов в засушливой зоне (Кулик и др., 2021; Трещевская и др., 2021).

Первая локация выбрана, исходя из большого количества *E. angustifolia*, естественно произрастающих по склонам овражно-балочной системы и в составе защитной лесной полосы



Рис. 1. Объекты исследования: *Elaeagnus angustifolia* (a) и *Caragana arborescens* (b)

в 2 км южнее поселка Оленье Дубовского района Волгоградской области (координаты 49,157950° N, 44,867218° E). Ближайшая автотрасса расположена в 1,5 км к западу, промышленные предприятия в радиусе 20 км отсутствуют, сельскохозяйственная деятельность на прилегающей территории не ведется (рис. 2a).

Вторая локация, на которой изучали *E. angustifolia*, расположена по обе стороны федеральной автомобильной дороги Р228 Сызрань – Волгоград вблизи 676 км непосредственно у въезда в город (координаты 48,869650° N, 44,618308° E). Интенсивное движение по дороге, несанкционированные стоянки большегрузного автотранспорта, близость Волгоградского алюминиевого завода компании «Русал», который за 50 лет работы существенно загрязнил почву в радиусе нескольких километров и после возобновления производства периодически производит токсические выбросы в атмосферу, формируют на этой территории высокий уровень антропогенной нагрузки (рис. 2b).

Третий участок расположен на территории Кировского района города Волгограда в пятистах метрах югу от поселка Горная Поляна и является частью Кировского селекционно-семеноводческого комплекса – питомника ФНЦ агроэкологии РАН (координаты 48,617218° N, 44,374706° E). На этом участке выбрали две группы деревьев, расположенных на его северной и южной границах, для которых по результатам многолетнего мониторинга установлен высокий уровень антропогенного воздействия, которое заключается в замусоренности строительными материалами и пищевыми отходами, эпизодическом выпасе коз, разжигании костров, а также высокой запыленности участка в месте прилегания к проселочной дороге. В составе травянистых растительных сообществ на этой территории выявлено множество рудеральных видов травянистых растений (рис. 2d).



Рис. 2. Карта-схема расположения изучаемых локаций *Elaeagnus angustifolia* (a, b) и *Caragana arborescens* (d, e) на территории Волгоградской области (c)

1 – участок федеральной защитной лесной полосы и балки вблизи поселка Оленье, 2 – участок федеральной автомобильной дороги Р228 Сызрань – Волгоград, 3 – Ольховское лесничество, 4 – Кировский селекционно-семеноводческий комплекс.

В качестве четвертого участка выбрано место широкомасштабной интродукции *C. arborescens* на территории Ольховского лесничества (координаты 49,792305° N, 44,683398° E), которое находится в двух километрах к северо-востоку от поселка Ольховка и характеризуется низким уровнем антропогенной нагрузки, не используется для хозяйственной деятельности человека и не является местом отдыха для местного населения. Ближайшая дорога с твердым покрытием и малоинтенсивным движением автотранспорта находится в 300 м от обследованного массива (рис. 2е).

Сбор листовых пластинок проводили во второй декаде июня, выбирая для анализа фенотипически здоровые и нормально развитые растения, расположенные на 20–30 м вглубь от границы участка, что обеспечивало, с учетом их равномерной посадки в составе массива, одинаковую освещенность и не препятствовало запылению от прилегающих грунтовых дорог, в случае их наличия. Листья забирали азимутальным способом (с 8 одного вегетационного возраста побегов по кругу от севера по часовой стрелке) на высоте 150–180 см от почвы. От сложного листа отбирали вторые-третьи листочки от верхушки, ориентируясь на их свободное, нестесненное и незатененное расположение на листе и отсутствие видимых повреждений – всего по 16 листочков от одного кустарника.

До анализа листья помещали в промаркированные пластиковые конверты и хранили в переносном холодильнике при +4 °C не более 8 часов.

Компьютерную цветометрию проводили после сканирования адаксиальной (лицевой) поверхности листовых пластинок в RGB-формате на аппарате Canon MF-4410. Оцифрованные изображения обрабатывали программой открытого доступа ImageJ (Wayne Rasband, США), в результате чего получали основные цветовые характеристики: среднюю интенсивность отражения раздельно по R, G и B каналам (усл. ед.), продольный (апикальный) и поперечный градиенты средней интенсивности зеленого (%) (Широкий, Новочадов, 2022). Для цифровой спектрометрии листовых пластинок использовали портативный спектрометр SpectraPen SP-110 (Photon Systems Instruments, Чехия), позволяющий измерять диффузное отражение и пропускание в диапазон длин волн от 340 нм до 790 нм и преобразовывать спектры в необходимые форматы. Данные экспортировали в Excel и рассчитывали для каждой длины волны величину светопоглощения по формуле (Zhang et al., 2022):

$$A = \log(1 - I_0)/(1 - I_s),$$

где: I_0 - интенсивность отражения света сравнения (от стандарта белого цвета); I_s – измеренная интенсивность отражения света исследуемого образца.

В рамках настоящего исследования обращали внимание на A_{430} , A_{647} , A_{460} , и A_{664} , поскольку поглощение на соответствующих длинах волн является специфичным для отдельных пигментов.

Содержание основных пигментов в адаксиальном эпидерме листовых пластинок определяли с помощью спектрографического анализатора «Dualect Scientific+» («Force-A», Франция). Измеряли содержание суммарного хлорофилла (a + b), флавоноидов и антоцианов. Эти данные представляли в мкг/см² сырой массы. Дополнительно рассчитывали индекс азотного баланса (NBI) как соотношение количества хлорофиллов и флавоноидов (азот/углерод) в условных единицах (усл. ед.) (Haworth et al., 2023).

Для статистических расчетов и графической визуализации результатов исследования использовали возможности программного пакета Statistica 12.0 (StatSoftInc, США). Использовали непараметрические показатели для характеристики выборок, статистическую характеристику выборки представляли в форме медианы и межквартильный интервал – Me ($Q1 \div Q3$). Во всех случаях уровень статистической значимости различий по критерию Манна-Уитни принимали равным $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При измерении удельной интенсивности в формате RGB было выявлено, что величины по всем каналам цветопередачи различаются для двух исследуемых видов. В противовес этому, на различия в состоянии окружающей среды реагировали только показатели продольного (апикального) и поперечного градиента интенсивности по G. Минимальная интенсивность зеленого приходилась на центральную область листовой пластинки, по краям и к верхушке листа величина показателя увеличивалась, косвенно свидетельствуя о большей концентрации ключевого пигмента. Продольный и поперечный градиенты интенсивности зеленого были выше в листовых пластинках, взятых на участках с высокой степенью антропогенные загрязнения, в 1,27–1,60 раза (табл. 1).

Таблица 1

Результаты компьютерной цветометрии листовых пластинок *Elaeagnus angustifolia* и *Caragana arborescens*

Показатель	<i>Elaeagnus angustifolia</i>		<i>Caragana arborescens</i>	
	Локация (уровень антропогенного воздействия)			
	1 (низкий)	2 (высокий)	3 (низкий)	4 (высокий)
Удельная интенсивность по R, усл. ед.	2,63 (2,41÷2,87)	3,11 (2,82÷3,48)	3,96 * (3,34÷4,68)	4,26 * (3,69÷4,95)
Удельная интенсивность по G, усл. ед.	6,59 (5,89÷7,16)	6,72 (6,04÷7,35)	8,21 * (7,73÷0,52)	8,55 * (7,79÷9,34)
Удельная интенсивность по B, усл. ед.	4,55 (4,09÷5,11)	4,48 (3,96÷4,92)	3,22 * (2,94÷3,59)	3,18 * (2,77÷3,51)
Продольный градиент интенсивности G, %	6,45 (5,70÷7,08)	10,33 # (9,40÷12,06)	6,75 (6,23÷7,30)	8,54 *# (7,89÷9,19)
Поперечный градиент интенсивности G, %	2,66 (2,39÷2,95)	3,95 # (3,52÷4,33)	3,15 (2,80÷3,48)	4,19 # (3,87÷4,69)

Примечание к таблице. Здесь и далее знаком * отмечены статистически значимые различия между показателями у двух исследованных видов, знаком # – между показателями в двух локациях у одного вида.

По результатам спектрометрии листовых пластинок было выявлено, что спектрограммы листовых пластинок имеют незначительные различия как между видами, так и между группами растений, находящихся в различных условиях окружающей среды, что свидетельствует о невысокой чувствительности измеряемых признаков. Типичные спектрограммы представлены на рисунке 3.

Величины светопоглощения в «зонах интереса» также подтверждают чувствительность данных показателей, в особенности коэффициента светопоглощения A_{664} , в отношении биологической реакции листовых пластинок на неблагоприятные условия окружающей среды (табл. 2).

Определение концентрации хлорофилла в листовых пластинках при микроспектрометрии выявило относительно более высокое содержание хлорофилла в листовых пластинках *C. arborescens* в сравнении с *E. angustifolia*. Содержание в них пигмента различалось на исследованных участках в зависимости от уровня антропогенного воздействия: при высоком уровне его концентрация оказывалась, соответственно, в 1,47 раза и 1,38 раза ниже, чем при высоком.

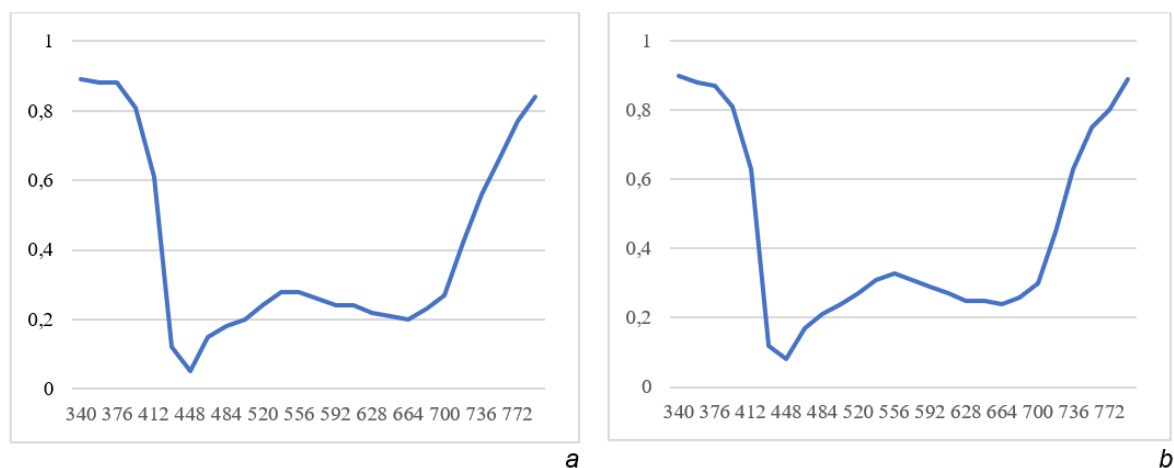


Рис. 3. Спектрограммы листовых пластинок *Caragana arborescens* при низком (а) и высоком (б) уровне антропогенного загрязнения
По оси абсцисс – длина волны (нм), по оси ординат – светопоглощение (%).

Таблица 2
Результаты микроспектрометрии листовых пластинок *Elaeagnus angustifolia* и *Caragana arborescens*

Показатель светопоглощения	<i>Elaeagnus angustifolia</i>		<i>Caragana arborescens</i>	
	Локация (уровень антропогенного воздействия)			
	1 (низкий)	2 (высокий)	3 (низкий)	4 (высокий)
A ₄₃₀	2,64 (2,40÷2,91)	2,75 (2,59÷3,05)	2,88 (2,57÷3,20)	2,93 (2,62÷3,31)
A ₄₆₀	2,46 (2,18÷2,73)	2,87 (2,49÷3,21)	3,20 * (2,88÷3,71)	3,32 (2,96÷3,84)
A ₆₄₇	2,33 (2,04÷2,57)	2,37 (2,11÷2,63)	2,40 (2,17÷2,69)	2,44 (2,21÷2,70)
A ₆₆₄	1,80 (1,55÷2,06)	2,62 # (2,28÷2,97)	2,72 * (2,54÷2,95)	3,48 *# (2,06÷3,84)

Содержание флавоноидов, как и хлорофилла, было относительно выше в листовых пластинках *C. arborescens*, но у обоих видов между участками с различным уровнем антропогенного воздействия практически не различалось. Также не было выявлено различий между группами при анализе концентрации антоцианов. Индекс азотного баланса в листовых пластинках при повышенной антропогенной нагрузке у *E. angustifolia* был ниже в 1,68 раза, у *C. arborescens* – в 1,42 раза (табл. 3).

Проведенная в настоящем исследовании оценка цветометрических и спектрометрических характеристик листовых пластинок *E. angustifolia* и *C. arborescens* является частью планомерной работы ФНЦ агроэкологии РАН по анализу состояния аборигенных и интродуцированных древесно-кустарниковых растений, высаженных на территории региона с целью защитного лесоразведения, их восстановления и формирования новых устойчивых экосистем (Егоров и др., 2023; Кулик и др., 2023).

Полученные в работе данные подтверждают достаточно высокую жизнестойкость выбранных растений в засушливых условиях Волгоградской области. Тем не менее, они в полной мере способны к стрессовой реакции на высокие по интенсивности воздействия факторов окружающей среды, в том числе – к антропогенному воздействию (Крючков, Маттис, 2014).

Таблица 3

Результаты определения основных пигментов в листовых пластинках
Elaeagnus angustifolia и *Caragana arborescens*

Показатель	<i>Elaeagnus angustifolia</i>		<i>Caragana arborescens</i>	
	Локация (уровень антропогенного воздействия)			
	1 (низкий)	2 (высокий)	3 (низкий)	4 (высокий)
Суммарный хлорофилл (мкг/см ² сырой массы)	28,8 (26,6÷30,4)	19,6 # (17,9÷21,4)	34,8 * (32,1÷37,0)	25,2 *# (23,0÷27,8)
Флавоноиды (мкг/см ² сырой массы)	1,06 (0,94÷1,15)	1,22 # (1,14÷1,35)	1,31 * (1,20÷1,44)	1,35 (1,23÷1,48)
Антоцианы, мкг/см ² сырой массы	0,35 (0,31÷0,39)	0,33 (0,29÷0,37)	0,18 * (0,16÷0,21)	0,20 * (0,17÷0,23)
Индекс азотного баланса, усл. ед.	27,2 (25,0÷29,4)	16,1 # (14,8÷17,3)	26,6 (24,2÷29,1)	18,7 # (16,9÷20,2)

Одним из результатов подобной реакции становится увеличение содержания и изменение пространственного распределения хлорофилла и других пигментов, что отражается на цветометрических и спектрографических характеристиках листовых пластинок (Ракутько и др., 2022). Метод анализа оцифрованных изображений в RGB-формате является очень удобным ввиду возможности их использования в любое время и отсутствия необходимости забора и перемещения биологического материала.

Представляется вполне логичным, что в ответ на неблагоприятные воздействия растение, по сути, находясь на грани токсического стресса, интенсифицирует процессы фотосинтеза. Сходные реакции описаны и для других видов реагирования растений на абиотические стрессы (Самусик, Головатый, 2022; Стасова и др., 2023).

Естественным следствием подобных процессов становится активация свободно-радикального окисления в тканях, которое происходит при участии активных форм кислорода и, по некоторым данным, азота. Последующее накопление флавоноидов, антоцианов и полифенольных соединений также может отражаться на цветовых характеристиках листовых пластинок (Karoor et al., 2019; Hasanuzzaman et al., 2020).

Проведенное исследование носило пилотный характер и поставило несколько новых вопросов. В частности, осталось неясным, каковы сезонные ограничения применения данных методик в полевых условиях, необходимо ли во всех случаях использовать их в комплексе с лабораторным определением пигментов или других веществ в листовых пластинках, наконец, необходима обоснованная стандартизация отбора материала для анализа.

Безусловно, для получения новых данных как о структурной организации листовых пластинок, так и в отношении сравнительной информативности использованных методов, было бы интересным получить также градиенты спектральных характеристик листа и сопоставить их с цветометрическими градиентами, провести калибровку RGB-сигналов и разработать программы автоматизированного цветометрического анализа. Это может являться основными направлениями наших дальнейших исследований в этой области и найти более точные и доказательные алгоритмы.

Тем не менее, цветометрия, в силу ее простоты и доступности, возможности исследования *in situ*, перспективна в комплексе подобных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования дополнительно подтверждено, что древесно-кустарниковые растения лоха узколистого *E. angustifolia* и караганы древовидной *C. arborescens* могут быть использованы в качестве биоиндикаторов в засушливой зоне.

Неблагоприятное воздействие антропогенных факторов может быть выявлено по изменениям цветовых показателей листовой пластинки, из которых наиболее

информативными являются продольный (апикальный) и поперечный градиент интенсивности зеленого в формате RGB.

Анализ спектральных характеристик листовых пластинок по своей чувствительности сопоставим и даже превосходит метод цветометрии. Чувствительным маркером на спектрограммах является коэффициент светопоглощения при 664 нм, связанный с концентрацией хлорофиллов в листовой пластинке.

Цветометрический и спектрометрический методы на настоящий момент могут эффективно использоваться в комплексе анализа листовых пластинок с целью биоиндикации.

Благодарности. Авторы выражают признательность д. с.-х. н. С. Н. Крюкову (ФНЦ агроэкологии РАН) за помощь в организации полевых исследований и консультации по вопросам интродукции караганы на территорию Волгоградской области.

Исследование выполнено в рамках государственного задания FNFE-2025-0010 «Изучение основных путей реализации морфогенеза in vitro и факторов абиотической и биотической природы, регулирующих процессы регенерации древесно-кустарниковых и культурных растений».

Список литературы

- Егоров С. А., Крючков С. Н., Солонкин А. В., Соломенцева А. С., Романенко А. К., Горбушова Д. А. Особенности адаптации древесных и кустарниковых видов в архиве популяций и клонов насаждений г. Волгограда // Научно-агрономический журнал. – 2023. – № 3 (122). – С. 60–67.
- Катаев М. Ю., Даданова М. М. Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа RGB изображений // Светотехника. – 2019. – № 2. – С. 34–39.
- Красноярцева Б. А., Назаренко А. Е., Плуталова Т. Г., Шарабарина С. Н., Барышников С. Г. Оценка уязвимости аграрно-ориентированных природно-хозяйственных систем // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. – 2024. – Т. 49. – С. 72–87.
- Крючков С. Н., Маттис Г. Я. Лесоразведение в засушливых условиях. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2014. – 300 с.
- Кулик К. Н., Исаков А. С., Новочадов В. В. Новые возможности анализа листовых пластинок деревьев-биоиндикаторов в оценке состояния окружающей среды в условиях аридной зоны // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 1(61). – С. 25–36.
- Кулик К. Н., Беляев А. И., Пугачёва А. М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. – 2023. – Т. 29, № 1 (94). – С. 4–14.
- Ляшенко О. А. Биоиндикация и биотестирование в охране окружающей среды. – СПб.: СПб ГТУРП, 2019. – 67 с.
- Протасова М. В., Проценко Е. П., Петрова И. В., Петров С. С., Саад Ф. Сабр. Использование методов биоиндикации при исследовании экологического состояния городской среды // Экология урбанизированных территорий. – 2019. – № 3. – С. 136–140.
- Ракутько С. А., Васькин А. Н., Ракутько Е. Н. Применение морфо-цветометрического анализа в биоиндикации экосистем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2022. – № 3 (67). – С. 445–458.
- Самусик Е. А., Головатый С. Е. Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2022. – № 2. – С. 78–86.
- Стасова В. В., Скрипальщикова Л. Н., Астраханцева Н. В., Барченков А. П. Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии // Известия вузов. Лесной журнал. – 2023. – № 3. – С. 35–47.
- Трещевская Э. И., Тихонова Е. Н., Голядкина И. В., Трещевская С. В., Князев В. И. Карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam.) как кустарниковая порода при биологической рекультивации техногенных ландшафтов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 31–44.
- Турмухаметова Н. В. Использование морфометрических и фенологических показателей *Tilia cordata* Mill. для целей биоиндикации // Самарский научный вестник. – 2019. – Т. 8, № 4. – С. 93–97.
- Черноусова О. В., Рудаков О. Б. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа // Химия, физика и механика материалов. – 2019. – № 2 (21). – С. 55–125.
- Широкий А. А., Новочадов В. В. Цифровые методики в имидж-анализе растительных сообществ аридных зон // Физико-техническая информатика СРТ2022: Матер. X Междунар. конф. (Пушино 16–20 мая 2022 г.). – Нижний Новгород – Москва – Пушино, 2022. – С. 140–150.
- Hasanuzzaman M., Bhuyan M.H.M.B., Zulfiqar F., Raza A., Mohsin S.M., Mahmud J.A., Fujita M., Fotopoulos V. Reactive oxygen species and antioxidant defense in 161 plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator // Antioxidants. – 2020. – Vol. 9. – e681.

Haworth M., Marino G., Atzori G., Fabbri A., Daccache A., Killi D., Carli A., Montesano V., Conte A., Balestrini R., Centritto M. Plant physiological analysis to overcome limitations to plant phenotyping // *Plants* (Basel). – 2023. – Vol. 12, N 23. – e4015.

Kapoor D., Singh S., Kumar V., Romero R., Prasad R., Singh J. Antioxidant enzymes regulation in plants in reference to reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS) // *Plant Gene*. – 2019. – Vol. 19. – e100182.

Zaghloul A., Saber M., Gadow S., Fikry A. Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems // *Bulletin of the National Research Centre*. – 2020. – Vol. 44. – e127.

Zhang H., Ge Y., Xie X., Atefi A., Wijewardane N. K., Thapa S. High throughput analysis of leaf chlorophyll content in sorghum using RGB, hyperspectral, and fluorescence imaging and sensor fusion // *Plant Methods*. – 2022. – Vol 18, N 1. – e60.

Zhou A., Ge B., Chen S., Kang D., Wu J., Zheng Y., Ma H. Leaf ecological stoichiometry and anatomical structural adaptation mechanisms of *Quercus* sect. *Heterobalanus* in southeastern Qinghai-Tibet Plateau // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Vol. 24, N 1. – e325.

Kulik K. N., Isakov A. S., Novochadov V. V. Colorimetric and Spectral Characteristics of *Caragana arborescens* and *Elaeagnus angustifolia* Leaves as Potential Indicators of Anthropogenic impact // *Ekosistemy*. 2025. Iss. 41, P. 129–137.

The development and implementation of new systems for obtaining and computer analysis of biological images and spectrograms, which increased the indicative possibilities and opened opportunities for expanding the number of applicable species in subarid areas, causes the relevance of this study. The shrubs *Elaeagnus angustifolia* and *Caragana arborescens*, widely used in the south-east of European Russia for the reclamation of man-made landscapes, protective afforestation, were selected as the objects of research. For collecting material, we used sites with low and high levels of anthropogenic impact, characterized by an increased content of toxic trace elements in the soil and air pollution. Resulting from the colorimetric analysis, the more expressive changes we recorded for the longitudinal and transverse gradients of green for both studied species. Spectrometry revealed that the light absorption intensity at the wavelength of A664 was sensitive to the level of anthropogenic load for the selected plants. The determination of total chlorophyll, flavonoid, anthocyanin concentrations, along with the calculation of the nitrogen balance index in leaf blades by the «Dualox Scientific+» spectrometer clearly demonstrated differences in the values of these indicators among the selected biological species and their growth in areas with varying degrees of anthropogenic impact. A comparative analysis of the results between species, as well as between sites with different degrees and nature of anthropogenic load, allowed us to conclude that both approaches could currently be effectively combined with classical bioindication methods. The sufficiently high sensitivity of *E. angustifolia* and *C. arborescens* to changes in environmental pollution recommends these species as a potential plant bioindicator in the subarid zone.

Key words: leaf blade, computer colorimetry, spectral analysis, *Caragana arborescens*, *Elaeagnus angustifolia*, bioindication, anthropogenic pollution.

Поступила в редакцию 20.02.25

Принята к печати 12.03.25