

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЛИСТЬЕВ *CARAGANA ARBORESCENS* LAM. В ЗАСУШЛИВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

К.Н. Кулик¹, *А.С. Исаков¹, **В.В. Новочадов²

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

²Волгоградский государственный университет, Россия, Волгоград
e-mail: *isakov-a@vfanc.ru, **novochadov.valeriy@volsu.ru

В исследовании изучены закономерности роста и формирования фенотипических признаков интродуцированных форм *C. arborescens* в части структурных и биохимических особенностей ее листовых пластинок в условиях засушливого климата и при различном уровне антропогенного воздействия. Комплексный анализ выявил новые факты о пространственной организации листовых пластинок, градиентах их цветометрических и биохимических характеристик на площадках с различными физико-химическими свойствами светло-каштановых почв. Высокая чувствительность *C. arborescens* к воздействию факторов окружающей среды позволяет рекомендовать этот вид в качестве растения-биоиндикатора в условиях засушливой зоны.

Ключевые слова: *Caragana arborescens*, засушливая зона, антропогенное воздействие, листья, компьютерная морфометрия, компьютерная цветометрия, биохимический анализ, биоиндикация, Волгоградская область.

Введение

Рациональное природопользование на засушливых территориях Юго-востока Европейской части России (ЮВ ЕЧР) немыслимо без реализации целенаправленного междисциплинарного подхода к борьбе с прогрессирующим опустыниванием и последствиями многокомпонентного антропогенного воздействия на ключевые экосистемы этих регионов [1, 2, 3]. Совокупность климатических и антропогенных факторов, наряду с общепризнанной динамичностью и вариабельностью территориального распределения доминирующих воздействий, в настоящее время привлекает внимание специалистов с позиций взаимодействия с окружающими естественными и искусственными экосистемами, созданными человеком в целях повышения их продуктивности, восстановления положительного баланса природных факторов и возмещения ущерба, нанесенного хозяйственной деятельностью [4, 5].

Фитоиндикация является одним из наиболее адекватных и чувствительных методов получения информации о состоянии экосистем и прогностического моделирования их поведения при различных целенаправленных воздействиях [6, 7]. При использовании для фитоиндикации многолетних растений основой анализа становится ежегодно обновляемая их часть, чаще всего листья. Эти изменения могут фиксироваться для отдельных растений и использоваться в процессе селекционного отбора, либо обобщаться и рассматриваться как компонент коллективного ответа растительного сообщества в рамках биоиндикации состояния окружающей среды [8].

Если в ареалах распространения древесно-кустарниковых растений с достаточным увлажнением перечень биоиндикаторов хорошо обоснован и сформирован (включая представителей *Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Pinus*, *Pópulus*, *Quércus*, *Tilia*, *Ulmus*) [9], то для засушливых территорий этот перечень гораздо уже. Здесь использование большинства классических биоиндикаторов ввиду жестких климатических и почвенных условий ограничено или принципиально невозможно [10, 11].

Один из удачных вариантов для этого – *Caragana arborescens* Lam. (карагана древовидная, желтая акация), обладающая всеми необходимыми характеристиками для стабильного существования популяций и формирования зависимых растительных сообществ в засушливых условиях. Это древесно-кустарниковое растение в 50-70-е годы прошлого столетия было успешно интродуцировано на территорию Волгоградской области из Восточной Сибири и использовалось преимущественно в виде кулисных посадок и опушечных рядов в составе защитных лесных полос различного назначения. В этих условиях *C. arborescens* зарекомендовала себя как растение, устойчивое к высоким и низким температурам, почвенному засолению, дефициту влаги, запылению и другим негативным факторам [12, 13]. Имеются сведения о возможности использования растений рода *Caragana* в качестве растения-биоиндикатора [14, 15].

Для анализа листьев применяется набор классических количественных показателей, индексов и коэффициентов, которые позволяют получить сведения о состоянии отдельного растения, популяции деревьев или кустарников и использоваться как компонент фитоиндикации [16, 17].

Современная биология и экология в полной мере оказались вовлеченными в глобальный процесс цифровизации технологического уклада, одним из проявлений которого стало принципиальное изменение способов получения, хранения, количественной обработки и воспроизведения цветовых характеристик биологических объектов. В то же время комплексный анализ, включающий в себя получение классических морфологических показателей, данных цветометрии, а также биохимических характеристик, как это очевидно получается при исследовании листовых пластинок, в каждом случае требует понимания сравнительной точности, информативности и чувствительности измерений [18, 19, 20].

Цель исследования – выяснить возможности комплексного анализа листовых пластинок *Caragana arborescens* для оценки состояния ее популяций и фитоиндикации негативных природно-климатических факторов и антропогенных воздействий на Юго-востоке Европейской части России.

Материалы и методы

Место компактного произрастания *C. arborescens* расположено на территории Кировского района города Волгограда в 600 м к югу от поселка Горная Поляна и является частью Кировского селекционно-семеноводческого комплекса и питомника ФНЦ агроэкологии РАН. Кустарники были высажены из вегетативного материала через каждые 5 м в 2000 году, посадки протянулись с севера на юг на 330 м, ширина их с учетом междурядий – 21 м (рис. 1).

Местность выровненная, ограничена с севера защитной лесополосой (за которой дачный массив «Дубок»), с востока – ЛЭП, с юга – грунтовой дорогой (за которой залежь), с запада – другими искусственными насаждениями (координаты 48.617218 N, 44.374706 E).

Почва светло-каштановая, гумифицированный слой от 2 до 5 см, глубина корнеобитаемого слоя около 30 см (для травянистых растений). На территории находится 116 кустарников при первичной посадке 134 саженцев, т. е. сохранность популяции на настоящий момент составляет 86,6 %. *C. arborescens* на этой территории сохранила все фенотипические видовые признаки и демонстрирует высокую жизненность (рис. 2).

По итогам проводимых ранее таксационных исследований сотрудниками ФНЦ агроэкологии РАН [21] и непосредственно авторами исследуемая территория была разделена на шесть участков.

Участки 1 и 6 занимают северную и южную оконечности посадки. На них по результатам многолетнего мониторинга установлен высокий уровень антропогенной нагрузки, которая на участке 1 заключается в замусоренности строительными материалами и пищевыми отходами, эпизодическом выпасе коз, а также разжигании костров. Участок 6 граничит с проселочной дорогой и характеризуется высокой запыленностью. На нем также зарегистрированы последствия сброса строительного мусора; в составе травянистых

растительных сообществ множество рудеральных видов. В местах утраченных кустарников и между рядами посадок имеются самосевы вяза мелколистного (*Ulmus pumila* L.) и скумпии кожевенной (*Cotinus coggygia* Scop.). В совокупности на этой территории произрастает 25 кустарников *C. arborescens*.

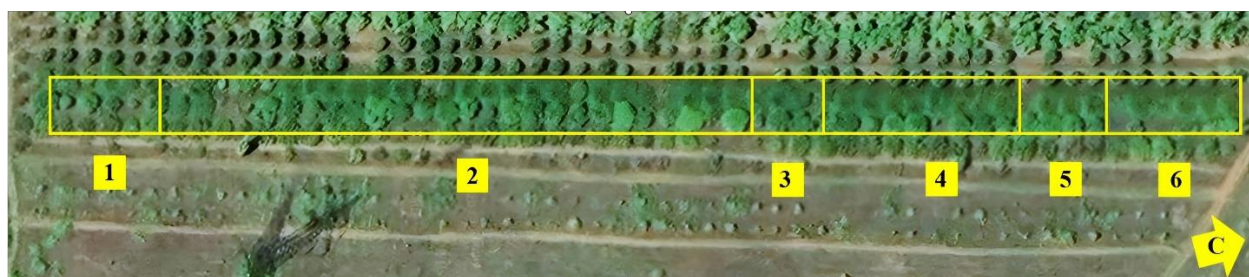


Рисунок 1 – Расположение участков на территории компактного произрастания *Caragana arborescens*. 1, 6 – с высоким уровнем антропогенного воздействия; 2, 4 – без особенностей (основная часть территории); 3, 5 – с высоким содержанием солей в почве.



А



Б

Рисунок 2 – Внешний вид объекта исследования – *Caragana arborescens* в различные фенофазы. А – Вегетационный рост. Б – Начало листопада.

Участки 2 и 4 занимают основную часть посадки *C. arborescens*, на них произрастает 74 кустарника. В пределах этой локации каких-либо особенностей, влияющих на рост и развитие растений, не выявлено, или они были минимальными. Эти участки были отнесены к территории с ненарушенной экосистемой.

Участки 3 и 5 имеют небольшую протяженность и общее происхождение. Это бывшие естественные западины. В них накапливалась атмосферная влага, которая в теплый период выпаривалась вследствие высокой инсоляции, оставляя в почве большое количество осадочных солей. Но даже после предпосадочной обработки почвы сохранили засоленность, образовав постоянно действующий негативный фактор среды. По данным лаборатории анализа ФНЦ агроэкологии РАН, при исследовании летом 2023 года содержание натрия на

этих участках составляет $23,9 \pm 2,0$ г/кг, калия $20,8 \pm 2,3$ г/кг; хлоридов $27,3 \pm 2,4$ г/кг (на прилегающей территории – $13,2 \pm 1,5$ г/кг, $17,4 \pm 2,0$ г/кг и $18,1 \pm 2,0$ г/кг, соответственно). Это является критерием слабой засоленности почвы хлоридного типа [22]. На участках 3 и 5 в совокупности произрастает 17 кустарников.

В качестве объекта для непосредственного анализа собирали листовые пластинки *S. arborescens* во второй декаде июня, после формирования устойчивого листового покрова, с 10 деревьев на каждом участке. Листья забирали азимутальным способом (с восьми побегов одного вегетационного возраста 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, маркированные обертыванием черешка липким стикером, помещали в маркированные пластиковые конверты и хранили в переносном холодильнике при $+4$ °С не более 8 часов.

В качестве инструментария для сканирования листьев и компьютерной цветометрии применяли Canon MF-4410 со стандартным программным обеспечением производителя. Сканировали сразу по девять листьев, сохраняя маркировку. Оцифрованные изображения обрабатывали программой открытого доступа ImageJ (Wayne Rasband, USA), с помощью которой определяли длину главной жилки (см) и максимальный поперечник (см), а после бинаризации изображения – среднюю площадь листовой пластинки (см²). После рассечения изображения по главной жилке автоматически определяли площади каждой части и рассчитывали асимметрию A_S (%) по формуле:

$$A_S = 50 \times S_B / S_M, \quad (1)$$

где S_B – площадь большей части листа (см²); S_M – площадь меньшей части (см²).

Дополнительно каждый лист взвешивали и определяли его массу (г), а также удельную плотность (г/см²).

Компьютерную цветометрию проводили после сканирования адаксиальной (лицевой) поверхности листовых пластинок в RGB-формате, в результате чего получали основные цветовые характеристики: среднюю интенсивность отражения отдельно по R, G и B каналам (усл. ед.), а также рассчитывали асимметрию величин этих показателей (%), подобно тому, как это было сделано для площади листовой пластинки [23].

В завершение проводили биохимический анализ листовых пластинок. Содержание основных пигментов в адаксиальном эпидерме листьев определяли бесконтактным способом с помощью спектрографа «Dualex Scientific+» («Force-A», Франция) непосредственно на участках, перед забором листьев. Измеряли содержание суммарного хлорофилла (a + b), флавоноидов и антоцианов. Данные представляли в мкг/см² сырой массы. Дополнительно рассчитывали индекс азотного баланса (NBI) как соотношение количества хлорофиллов и флавоноидов (азот/углерод) в условных единицах (у.е.) [24].

Количественное определение белка в листовых пластинках растений проводили с помощью метода, основанного на взаимодействии свободных аминокислот с сульфогруппой красителя амидо-черного 10В. Вначале получали гомогенат из 100 мг растительных тканей в 5 мл дистиллированной воды. После смешивания 1 мл гомогената с 2 мл осаждающего раствора, содержащего лимонную кислоту, Na₂HPO₄·12H₂O и амидо-черный 10В в дистиллированной воде, пробирки центрифугировали в течение 15 мин при 1500 g и определяли оптическую плотность супернатанта на спектрофотометре ПЭ-5400 при 615 нм. Содержание белка X (мг/г) вычисляли по формуле:

$$X = 50 \times C \times E_x / E_c, \quad (2)$$

где C – концентрация белка в эталонном растворе (г/л); E_x – оптическая плотность исследуемого раствора; E_c – оптическая плотность калибровочного раствора [25].

Математический анализ полученных результатов проводили с помощью компьютерной программы Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США). Использовали непараметрические показатели

для характеристики выборок, наличия или отсутствия различий. Статистическую характеристику выборки представляли в форме медиана и межквартильный интервал – Me (Q1 ÷ Q3). Во всех случаях уровень статистической значимости различий по критерию Манна-Уитни принимали равным $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Средняя масса, удельная плотность листовых пластинок, а также линейные показатели – средняя длина главной жилки и максимальный поперечник на всем участке – не различались и находились в пределах фенотипических значений, свойственных данному виду. Средняя площадь листовой пластинки была на 13,2 % меньше на участках 1 и 6 (высокий уровень антропогенной нагрузки), но статистически значимых различий не было найдено (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты анализа морфологии листовых пластинок *Caragana arborescens*

Показатель	Локация		
	Участки 2 и 4	Участки 3 и 5	Участки 1 и 6
Масса листовой пластинки, (г)	0,33 (0,29÷0,38)	0,30 (0,27÷0,34)	0,29 (0,26÷0,33)
Удельная плотность листовой пластинки, г/см ²	0,062 (0,055÷0,071)	0,061 (0,054÷0,071)	0,064 (0,057÷0,075)
Длина главной жилки (см)	1,94 (1,77÷2,09)	1,92 (1,73÷2,03)	1,74 (1,59÷1,90)
Максимальный поперечник (см)	1,30 (1,15÷1,44)	1,27 (1,12÷1,40)	1,32 (1,18÷1,48)
Средняя площадь листовой пластинки (см ²)	5,3 (4,8÷5,9)	5,0 (4,5÷5,6)	4,6 (4,2÷5,0)
Асимметрия площади листовой пластинки (%)	4,4 (4,1÷4,8)	4,6 (4,2÷5,1)	7,1 (6,5÷7,9)*

Примечание: здесь и далее знаком * отмечены статистически значимые различия с величинами показателей для участка 1.

В противовес этому асимметрия площади листовой пластинки была в этих условиях в 1,61 раза больше, чем величина показателя у растений, произрастающих на участках 2 и 4 с ненарушенной экосистемой ($p < 0,05$).

При измерении удельной интенсивности в формате RGB было выявлено, что величины показателя различаются между зонами участками только по каналу G. Величина средней интенсивности зеленого была в 1,15 раза меньше у *C. arborescens* на участках 3 и 5 по сравнению с величиной показателя у растений, произрастающих на участках с ненарушенной экосистемой. Высокий уровень антропогенной нагрузки сопровождался изменением асимметрии интенсивности по всем каналам RGB: для красного увеличение асимметрии составило 44,6 %, для зеленого – 73,5 %, для синего – 54,2 % (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты компьютерной цветометрии листовых пластинок *Caragana arborescens*

Показатель	Локация		
	Участки 2 и 4	Участки 3 и 5	Участки 1 и 6
Удельная интенсивность (усл. ед.)			
по R	3,92 (3,52÷4,68)	3,95 (3,56÷4,72)	4,11 [3,89÷4,55]
по G	8,28 (7,85÷8,79)	8,05 (7,54÷8,60)	7,17 [6,75÷7,69]*
по B	3,16 (2,85÷3,53)	3,15 (2,85÷3,49)	3,20 [2,87÷3,48]
Асимметрия интенсивности (%)			
по R	6,5 (4,9÷7,2)	6,8 (6,1÷7,4)	9,4 (8,6÷10,4)*
по G	4,9 (3,7÷5,4)	5,2 (4,7÷5,8)	8,5 (7,7÷9,4)*
по B	5,9 (5,4÷6,6)	6,4 (5,8÷7,2)	9,1 (8,2÷10,2)*

Результаты биохимического анализа листовых пластинок *C. arborescens* показывают различия между участками с ненарушенной экосистемой и участками с высоким уровнем антропогенной нагрузки. Содержание суммарного хлорофилла в листовых пластинках при исследовании на участках 1 и 6 было ниже в 1,37 раза, индекс азотного баланса был ниже в 1,24 раза, содержание общего белка – выше в 1,26 раза (все $p < 0,05$). Содержание флавоноидов и антоцианов в листовых пластинках *C. arborescens* между участками не различалось (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты биохимического анализа листовых пластинок *Caragana arborescens*

Показатель	Локация		
	Участки 2 и 4	Участки 3 и 5	Участки 1 и 6
Суммарный хлорофилл (мкг/см ² сырой массы)	43,2 (40,5÷46,9)	40,4 (36,9÷43,8)	31,5 (28,3÷34,1)*
Флавоноиды (мкг/см ² сырой массы)	1,39 (1,28÷1,51)	1,36 (1,25÷1,47)	1,26 (1,19÷1,33)
Антоцианы, мкг/см ² сырой массы	0,18 (0,16÷0,21)	0,18 (0,15÷0,20)	0,20 (0,17÷0,23)
Индекс азотного баланса, усл. ед.	31,1 (28,4÷34,7)	29,7 (25,1÷33,3)	25,0 (22,8÷27,9)*
Содержание общего белка, %	1,72 (1,61÷1,82)	1,95 (1,77÷2,11)	2,16 (1,96÷2,37)*

Проведенная в настоящем исследовании оценка морфологических, цветометрических и биохимических характеристик листьев *C. arborescens* явилась частью проводимого в настоящее время специалистами ФНЦ агроэкологии РАН широкомасштабного анализа состояния древесно-кустарниковых растений (аборигенных и интродуцированных), высаженных ранее на территории региона с целью выращивания адаптированного посадочного материала для защитного лесоразведения. В рамках этой работы проводится также селекция наиболее ценных растений для последующего восстановления имеющихся и формирования новых устойчивых экосистем [3, 21].

Представители рода *Caragana*, интродуцированные на территорию Волгоградской области, по определению обладают высокой степенью адаптации к засушливым условиям, повышенной инсоляции, скудности и засоленности почвы, запыленности и сезонным перепадам температуры. Тем не менее, они в полной мере способны к стрессовой реакции на средовые воздействия высокой интенсивности и достаточно чувствительны к антропогенной нагрузке [26].

Полученные в работе данные, во-первых, подтверждают достаточно высокую жизнестойкость *C. arborescens* и сохранение основных физиолого-биохимических процессов в растениях данной популяции спустя 25 лет после посадки на территорию Волгоградской области. В рамках данного исследования это выражается в сохранении правильной формы листовых пластинок, их размеров, адекватного содержания ключевых пигментов и белка. Тем не менее, на участке, который оказался гетерогенным по признакам засоленности почвы и уровню антропогенной нагрузки, было выявлено несколько особенностей строения и свойств листовых пластинок, связанных с этими различиями.

Для растений, произрастающих на участках с засолением почвы, анализ не выявил ни одного статистически значимого различия с основной частью популяции. Это подтверждает уже приведенные сведения об устойчивости *C. arborescens* к изменениям химического состава почвы [12].

Статистически значимые различия, связанные с уровнем антропогенного воздействия, были выявлены в отношении асимметрии площади листовой пластинки, средней интенсивности зеленого, асимметрии по каналам R, G и B, а также для содержания в ней суммарного хлорофилла, белка и индекса азотного баланса. Эти различия являются подтверждением того факта, что листовые пластинки древесно-кустарниковых растений чутко

реагируют на изменения окружающей среды, в особенности вызванные нетипичными для природы воздействиями антропогенного характера [8].

Естественно, в данном случае речь идет о реакции всего растения на негативное воздействие, то есть о развитии абиотического антропогенного стресса. Одним из его механизмов, фиксируемым при биоиндикации, является комплексная пространственная и фазовая (динамическая) перестройка всех видов обмена, включая фотосинтез и метаболизм ключевых пигментов [27, 28, 29]. Как результат, в растительных тканях активируются катаболические процессы, в том числе свободно-радикальное окисление, что приводит к накоплению флавоноидов, антоцианов и полифенольных соединений [30, 31]. Эти процессы развиваются мозаично, обладают значительными градиентами и признаками асимметрии, что мы и наблюдаем при цветометрии и биохимическом анализе листовых пластинок.

Безусловно, для подтверждения получения новых данных о структурной организации листовых пластинок необходимо расширить возможности спектральных методов и сформировать максимально короткую, но информативную линейку биохимических методик. Тем не менее, цветометрические методики, в силу их простоты и доступности, возможности исследования *in situ*, перспективны в комплексе подобных программ исследований.

Выводы

1. Популяция караганы древовидной (*C. arborescens*), высаженная 25 лет назад на засушливой территории Волгоградской области, сохраняет высокую жизнестойкость. Анализ листовых пластинок кустарника свидетельствует в целом о сохранении видовых характеристик их структуры и свойств.

2. Результаты исследования листовых пластинок *C. arborescens* подтверждают солеустойчивость растения: произрастание на почве с повышенным содержанием натрия, калия и хлоридов не отражается на их структурных и биохимических характеристиках.

3. Произрастание на территории с высоким уровнем антропогенной нагрузки сопровождается увеличением асимметрии площади листовой пластинки в 1,61 раза, снижением средней интенсивности зеленого в 1,15 раза, увеличением асимметрии по каналам R, G и B в 1,44-1,73 раза, снижением содержания суммарного хлорофилла (в 1,37 раза) и индекса азотного баланса (в 1,24 раза), но более высоким содержанием общего белка (в 1,26 раза). Это является отражением перестройки биосинтеза, активации свободнорадикального окисления и накопления запасных белков в результате развития стрессовой реакции растений на неблагоприятные условия внешней среды.

4. Цветометрия в формате RGB может использоваться для индикации уровня антропогенной нагрузки в комплексе с другими биоиндикационными методами. Наиболее информативным показателем при цветометрии является асимметрия интенсивности зеленого.

5. Высокая чувствительность *C. arborescens* к воздействию антропогенных факторов позволяет рекомендовать этот вид в качестве растения-биоиндикатора в условиях засушливой зоны.

Благодарности

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

1. Зонн И.С., Куст Г.С., Андреева О.В. Парадигма опустынивания: 40 лет развития и глобальных действий // Аридные экосистемы. 2017. № 3 (72). С. 3-16.
2. Деградация земель и опустынивание в России: новейшие подходы к анализу и поиску путей решения / Гл. ред. Г.С. Куст. М.: Изд-во Перо, 2019. 235 с.

3. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачева А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29. № 1 (94). С. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14.
4. Гладышева М.М., Гладышева К.С., Шишиморов А.П. Загрязнение окружающей среды: структурирование и визуализация мест загрязнений // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 11-26. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-1-112-1.
5. Красноярова 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. DOI: 10.26516/2073-3402.2024.49.72.
6. Ляшенко О.А. Биоиндикация и биотестирование в охране окружающей среды. СПб.: СПб ГТУРП, 2019. 67 с.
7. Турмухаметова Н.В. Использование морфометрических и фенологических показателей *Tilia cordata* Mill. для целей биоиндикации // Самарский научный вестник. 2019. Т. 8. № 4. С. 93-97. DOI: 10.17816/snv201984116.
8. 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. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13136.
9. Кузнецова А.С., Сотникова Е.В. Биоиндикационные показатели стабильности развития листовой пластинки *Populus tremula* в условиях воздействия транспортных потоков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2016. № 3. С. 45-52.
10. 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. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-02.
11. Zaghoul 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. DOI: 10.1186/s42269-020-00385-x.
12. Иозус А.П., Завьялов А.А., Крючков С.Н. Биоэкологическая характеристика древесных видов в условиях выращивания в сухой степи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 10. С. 131-134.
13. Кулик К.Н., Пугачева А.М. Структура растительных сообществ залежных земель в системе куртинных защитных лесных насаждений в сухих степях // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 1 (66). С. 77-85.
14. 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. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/3.
15. Wang Z., Xie L., Prather C.M., Guo H., Han G., Ma C. What drives the shift between sexual and clonal reproduction of *Caragana stenophylla* along a climatic aridity gradient? // BMC Plant Biology. 2018. Vol. 18. No. 1. e91. DOI: 10.1186/s12870-018-1313-6.
16. Нурминская Ю.В., Малков Ф.С., Бахвалов С.В. Автоматизация исследований морфологии листьев растений // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 1. С. 57-62. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-57-62.
17. Khadivi A., Mirheidari F., Saeidifar A., Moradi Y., Tunç Y. Morphological variation of *Ficus johannis* subsp. *afghanistanica* (Warb.) Browicz in Sistan-va-Baluchestan province, Iran // BMC Plant Biol. 2025. Vol. 25. No. 1. e24. DOI: 10.1186/s12870-025-06048-1.
18. Катаев М.Ю., Даданова М.М. Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа RGB изображений // Светотехника. 2019. № 2. С. 34-39.

19. 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. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-51.
20. 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. No. 1. e60. DOI: 10.1186/s13007-022-00892-0.
21. 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. DOI: 10.34736/FNC.2023.122.3.009.60-67.
22. Панкова Е.И., Конюшкова М.В., Горохова И.Н. О проблеме оценки засоленности почв и методике крупномасштабного цифрового картографирования засоленных почв // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 1. С. 26-54.
23. Широкий А.А., Новочадов В.В. Цифровые методики в имидж-анализе растительных сообществ аридных зон // Физико-техническая информатика СРТ2022: материалы X междунар. конф. Пушино, 2022. С. 140-150. DOI: 10.54837/9785604289174_140.
24. 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. No. 23. e4015. DOI: 10.3390/plants12234015.
25. Степанченко Н.С., Новикова Г.В., Мошков И.Е. Количественное определение содержания белка // Физиология растений. 2011. Т. 58. С. 624-630.
26. Крючков С.Н., Маттис Г.Я. Лесоразведение в засушливых условиях. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2014. 300 с.
27. Du F., Guan C., Jiao Y. Molecular mechanisms of leaf morphogenesis // Mol. Plant. 2018. Vol. 11. No. 9. P. 1117-1134. DOI: 10.1016/j.molp.2018.06.006.
28. 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. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47.
29. Самусик Е.А., Головатый С.Е. Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023. № 2. С. 78-86. DOI: 10.46646/2521-683X/2023-2-78-86.
30. 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 plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator // Antioxidants. 2020. Vol. 9. e681. DOI: 10.3390/antiox9080681.
31. 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 Biol. 2024. Vol. 24. No. 1. e325. DOI: 10.1186/s12870-024-05010-x.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 06.02.2025
Принята к публикации 19.06.2025

COMPLEX ANALYSIS OF THE LEAVES OF *CARAGANA ARBORESCENS* GROWING IN SEMI-ARID ZONES OF VOLGOGRAD REGION

K. Kulik¹, *A. Isakov¹, **V. Novochadov²

¹Federal Research Centre of Agroecology, Amelioration and Protective Afforestation of Russian Academy of Sciences, Russia, Volgograd

²Volgograd State University, Russia, Volgograd

e-mail: *isakov-a@vfanc.ru, **novochadov.valeriy@volsu.ru

The study examined the patterns of growth and formation of phenotypic features of introduced forms of *C. arborescens*, in terms of structural and biochemical features of leaf blades in arid climates and under different levels of anthropogenic impact. A comprehensive analysis revealed new facts about spatial organization of leaf blades, gradients of colorimetric and biochemical characteristics at sites with different physicochemical properties of light chestnut soils. The high sensitivity of *C. arborescens* to environmental factors makes it possible to recommend this species as a bio-indicator plant in arid zones.

Key words: *Caragana arborescens*, semi-arid zone, anthropogenic impact, leaves, computer morphometry, computer colorimetry, biochemical analysis, bioindication, Volgograd Region.

References

1. Zonn I.S., Kust G.S., Andreeva O.V. Paradigma opustynivaniya: 40 let razvitiya i global'nykh deistvii. Aridnye ekosistemy. 2017. N 3 (72). S. 3-16.
2. Degradatsiya zemel' i opustynivanie v Rossii: noveishie podkhody k analizu i poisku putei resheniya. Gl. red. G.S. Kust. M.: Izd-vo Pero, 2019. 235 s.
3. Kulik K.N., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. Rol' zashchitnogo lesorazvedeniya v bor'be s zasukhoi i opustynivaniem agrolandshaftov. Aridnye ekosistemy. 2023. T. 29. N 1 (94). S. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14.
4. Gladysheva M.M., Gladysheva K.S., Shishimorov A.P. Zagryaznenie okruzhayushchei sredy: strukturirovanie i vizualizatsiya mest zagryaznenii. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. 2023. N 1 (112). S. 11-26. DOI: 10.23859/1994-0637-2023-1-112-1.
5. Krasnoyarova B.A., Nazarenko A.E., Plutalova T.G., Sharabarina S.N., Baryshnikov S.G. Otsenka uyazvimosti agrarno-orientirovannykh prirodno-khozyaistvennykh system. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle. 2024. T. 49. S. 72-87. DOI: 10.26516/2073-3402.2024.49.72.
6. Lyashenko O.A. Bioindikatsiya i biotestirovanie v okhrane okruzhayushchei sredy. SPb.: SPb GTURP, 2019. 67 s.
7. Turmukhametova N.V. Ispol'zovanie morfometricheskikh i fenologicheskikh pokazatelei *Tilia cordata* Mill. dlya tselei bioindikatsii. Samarskii nauchnyi vestnik. 2019. T. 8. N 4. S. 93-97. DOI: 10.17816/snv201984116.
8. Protasova M.V., Protsenko E.P., Petrova I.V., Petrov S.S., Saad F. Sabr. Ispol'zovanie metodov bioindikatsii pri issledovanii ekologicheskogo sostoyaniya gorodskoi sredy. Ekologiya urbanizirovannykh territorii. 2019. N 3. S. 136-140. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-13136.
9. Kuznetsova A.S., Sotnikova E.V. Bioindikatsionnye pokazateli stabil'nosti razvitiya listovoi plastinki *Populus tremula* v usloviyakh vozdeistviya transportnykh potokov. Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2016. N 3. S. 45-52.
10. Kulik K.N., Isakov A.S., Novochadov V.V. Novye vozmozhnosti analiza listovykh plastinok derev'ev-bioindikatorov v otsenke sostoyaniya okruzhayushchei sredy v usloviyakh aridnoi zony. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2021. N 1 (61). S. 25-36. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-02.

11. 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. DOI: 10.1186/s42269-020-00385-x.
12. Iozus A.P., Zav'yalov A.A., Kryuchkov S.N. Bioekologicheskaya kharakteristika drevesnykh vidov v usloviyakh vyrashchivaniya v sukhoy stepi. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2018. N 10. S. 131-134.
13. Kulik K.N., Pugacheva A.M. Struktura rastitel'nykh soobshchestv zaleznykh zemel' v sisteme kurtinnykh zashchitnykh lesnykh nasazhdenii v sukhikh stepyakh. *Aridnye ekosistemy*. 2016. T. 22. N 1 (66). S. 77-85.
14. Treshchevskaya E.I., Tikhonova E.N., Golyadkina I.V., Treshchevskaya S.V., Knyazev V.I. Karagana drevovidnaya (*Caragana arborescens* Lam.) kak kustarnikovaya poroda pri biologicheskoi rekul'tivatsii tekhnogennykh landshaftov. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2021. T. 11. N 3. S. 31-44. DOI: 10.1034220/issn.2222-7962/2021.3/3.
15. Wang Z., Xie L., Prather C.M., Guo H., Han G., Ma C. What drives the shift between sexual and clonal reproduction of *Caragana stenophylla* along a climatic aridity gradient? *BMC Plant Biology*. 2018. Vol. 18. No. 1. e91. DOI: 10.1186/s12870-018-1313-6.
16. Nurminskaya Yu.V., Malkov F.S., Bakhvalov S.V. Avtomatizatsiya issledovaniy morfologii list'ev rastenii. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2017. T. 7. N 1. S. 57-62. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-57-62.
17. Khadivi A., Mirheidari F., Saeidifar A., Moradi Y., Tunç Y. Morphological variation of *Ficus johannis* subsp. *afghanistanica* (Warb.) Browicz in Sistan-va-Baluchestan province, Iran. *BMC Plant Biol.* 2025. Vol. 25. No. 1. e24. DOI: 10.1186/s12870-025-06048-1.
18. Kataev M.Yu., Dadonova M.M. Metodika raspoznavaniya rastitel'nosti na osnove tsvetovogo i tekturnogo analiza RGB izobrazhenii. *Svetotekhnika*. 2019. N 2. S. 34-39.
19. Rakut'ko S.A., Vas'kin A.N., Rakut'ko E.N. Primenenie morfo-tsvetometricheskogo analiza v bioindikatsii ekosistem. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*. 2022. N 3 (67). S. 445-458. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-51.
20. 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. No. 1. e60. DOI: 10.1186/s13007-022-00892-0.
21. Egorov S.A., Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Romanenko A.K., Gorbushova D.A. Osobennosti adaptatsii drevesnykh i kustarnikovykh vidov v arkhive populyatsii i klonov nasazhdenii g. Volgograda. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*. 2023. N 3 (122). S. 60-67. DOI: 10.34736/FNC.2023.122.3.009.60-67.
22. Pankova E.I., Konyushkova M.V., Gorokhova I.N. O probleme otsenki zasolennosti pochv i metodike krupnomasshtabnogo tsifrovogo kartografirovaniya zasolennykh pochv. *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*. 2017. T. 1. N 1. S. 26-54.
23. Shirokii A.A., Novochadov V.V. Tsifrovye metodiki v imidzh-analize rastitel'nykh soobshchestv aridnykh zon. *Fiziko-tekhnicheskaya informatika CPT2022: materialy X mezhdunar. konf. Pushchino*, 2022. S. 140-150. DOI: 10.54837/9785604289174_140.
24. 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. No. 23. e4015. DOI: 10.3390/plants12234015.
25. Stepanchenko N.S., Novikova G.V., Moshkov I.E. Kolichestvennoe opredelenie soderzhaniya belka. *Fiziologiya rastenii*. 2011. T. 58. S. 624-630.
26. Kryuchkov S.N., Mattis G.Ya. Lesorazvedenie v zasushlivykh usloviyakh. Volgograd: VNIALMI, 2014. 300 s.
27. Du F., Guan C., Jiao Y. Molecular mechanisms of leaf morphogenesis. *Mol. Plant*. 2018. Vol. 11. No. 9. P. 1117-1134. DOI: 10.1016/j.molp.2018.06.006.

28. Stasova V.V., Skripal'shchikova L.N., Astrakhantseva N.V., Barchenkov A.P. Fotosinteticheskie pigmenty v list'yakh berezy povisloi pri tekhnogennom vozdеistvii. Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal. 2023. N 3. S. 35-47. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47.
29. Samusik E.A., Golovaty S.E. Reaktsiya pigmentnoi sistemy drevesnykh rastenii na gazopylevoe zagryaznenie. Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya. 2023. N 2. S. 78-86. DOI: 10.46646/2521-683X/2023-2-78-86.
30. 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 plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. Antioxidants. 2020. Vol. 9. e681. DOI: 10.3390/antiox9080681.
31. 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 Biol. 2024. Vol. 24. No. 1. e325. DOI: 10.1186/s12870-024-05010-x.

Сведения об авторах:

Кулик Константин Николаевич

Академик РАН, д.с.-х.н., профессор, главный научный сотрудник, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН
ORCID 0000-0001-7124-8116

Kulik Konstantin

Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, Federal Research Centre of Agroecology, Amelioration and Protective Afforestation of Russian Academy of Sciences

Исаков Артем Сергеевич

Младший научный сотрудник лаборатории биотехнологии, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН
ORCID 0000-0002-8922-2042

Isakov Arteom

Junior Researcher of the Laboratory of Biotechnology, Federal Research Centre of Agroecology, Amelioration and Protective Afforestation of Russian Academy of Sciences

Новочадов Валерий Валерьевич

Д.м.н., профессор, профессор кафедры биоинженерии и биоинформатики, Волгоградский государственный университет
ORCID 0000-0001-6317-7418

Novochadov Valery

Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor of the Department of Bioengineering and Bioinformatics, Volgograd State University

Для цитирования: Кулик К.Н., Исаков А.С., Новочадов В.В. Комплексный анализ листьев *Caragana arborescens* Lam. в засушливых экосистемах Волгоградской области // Вопросы степеведения. 2025. № 2. С. 91-102. DOI: 10.24412/2712-8628-2025-2-91-102