

Ольга Олеговна Жолобова^{1✉}, Татьяна Васильевна Терещенко²

^{1,2}ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, Россия

¹zholobova-o@vfanc.ru

²tereschenko@vfanc.ru

АДАПТИВНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН НЕКОТОРЫХ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВЫХ ВИДОВ В УСЛОВИЯХ ОСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА *IN VITRO*

Цель исследований – оценка влияния моделируемого осмотического стресса в культуре *in vitro* на морфофизиологические и анатомические показатели листового аппарата отобранных генотипов древесно-кустарниковых растений. Исследования проводились на базе лаборатории биотехнологий ФНЦ агроэкологии РАН в 2023–2024 гг. Объекты исследований – три вида древесно-кустарниковых растений, перспективных в условиях засушливого климата: *Cotinus coggygria* Scop. (Скумпия кожевенная), карликовый подвой для косточковых *Prunus* VSL 2, *Caragana ruzgana* L. (карагана карликовая). Условия засухи смоделированы с использованием неионного осмотика полиэтиленгликоля с молекулярной массой 6000 (ПЭГ). Осмотический стресс в питательной среде оказывал ингибирующее действие на ростовые процессы всех исследуемых видов. Однако характер изменений носил видоспецифичные реакции. Общие изменения в листовых пластинах проявлялись в уменьшении размеров устьичных клеток, полном или частичном смыкании устьичной щели и более высокой плотности устьиц. После культивирования на среде с ПЭГ 60 г/л у *C. coggygria* площадь листовых пластин уменьшилась в 3,8 раза, для листьев *Prunus* VSL 2 – в 1,2 раза по сравнению с контролем. При культивировании на питательных средах, дополненных ПЭГ 60 г/л, выжили только способные к ризогенезу регенеранты *C. ruzgana*. Одним из критериев отбора более засухоустойчивых генотипов является показатель содержания хлорофилла в листовых пластинах, отражающий стабильную работу фотосинтетического аппарата. Для *C. ruzgana* этот показатель был ниже контроля в 2,5 раза. У адаптированных к водному дефициту *Prunus* VSL 2 и *Cotinus coggygria* содержание общего хлорофилла в листовых пластинах было больше.

Ключевые слова: засухоустойчивость древесно-кустарниковых видов, полиэтиленгликоль, осмотический стресс, *in vitro*, устьица, хлорофилл

Для цитирования: Жолобова О.О., Терещенко Т.В. Адаптивная изменчивость листовых пластин некоторых древесно-кустарниковых видов в условиях осмотического стресса *in vitro* // Вестник КрасГАУ. 2025. № 4. С. 47–54. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-4-47-54.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания НИР ФНЦ агроэкологии РАН № 122020100427-1 «Разработать научные основы сохранения и воспроизводства ценных генотипов древесных и кустарниковых растений в культуре *in vitro*».

Olga Olegovna Zholobova^{1✉}, Tatyana Vasilievna Tereshchenko²

^{1,2}FSC of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation of the RAS, Volgograd, Russia

¹zholobova-o@vfanc.ru

²tereschenko@vfanc.ru

ADAPTIVE VARIABILITY OF SOME WOODY-SHRUB SPECIES LEAF PLATES UNDER OSMOTIC STRESS *IN VITRO*

The aim of the study is to assess the effect of simulated osmotic stress *in vitro* culture on the morphophysiological and anatomical parameters of the foliar apparatus of the selected genotypes of woody and shrubby plants. The studies were conducted at the Laboratory of Biotechnology of the FSC of

*Agroecology of the RAS in 2023–2024. The objects of the study were three species of woody and shrubby plants that are promising in arid climates: *Cotinus coggygria* Scop. (*Cotinus coggygria* Scop.), dwarf rootstock for stone fruits *Prunus* VSL 2, *Caragana pygmaea* L. (Dwarf *caragana*). Drought conditions were simulated using a non-ionic osmotic agent polyethylene glycol with a molecular weight of 6000 (PEG). Osmotic stress in the nutrient medium had an inhibitory effect on the growth processes of all studied species. However, the nature of the changes was species-specific. General changes in leaf blades were manifested in a decrease in the size of stomatal cells, complete or partial closure of the stomatal slit and a higher density of stomata. After cultivation on a medium with PEG 60 g/l, the leaf blade area of *C. coggygria* decreased by 3.8 times, for *Prunus* VSL 2 leaves – by 1.2 times compared to the control. When cultivating on nutrient media supplemented with PEG 60 g/l, only regenerants of *C. pygmaea* capable of rhizogenesis survived. One of the criteria for selecting more drought-resistant genotypes is the chlorophyll content in leaf blades, reflecting the stable operation of the photosynthetic apparatus. For *C. pygmaea*, this indicator was 2.5 times lower than the control. In *Prunus* VSL 2 and *Cotinus coggygria* adapted to water deficit, the total chlorophyll content in leaf blades was higher.*

Keywords: drought resistance of tree and shrub species, polyethylene glycol, osmotic stress, *in vitro*, stomata, chlorophyll

For citation: Zholobova OO, Tereshchenko TV. Adaptive variability of some woody-shrub species leaf plates under osmotic stress *in vitro*. *Bulletin of KSAU*. 2025;(4):47-54. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-4-47-54.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state research assignment of the FSC of Agroecology of the RAS № 122020100427-1 “To develop scientific foundations for the conservation and reproduction of valuable genotypes of woody and shrubby plants *in vitro* culture”.

Введение. Проблемы опустынивания территорий, деградации и разрушения почв требуют ответных мер реагирования, и в первую очередь это необходимость вовлечения в защитные лесонасаждения новых, адаптированных к экстремальным почвенно-климатическим условиям генотипов древесно-кустарниковых видов.

Древесные растения реализуют свой адаптивный потенциал через изменения, происходящие на разных уровнях организации. Высокая степень чувствительности и изменчивости морфологических и анатомических признаков отмечается в листовых пластинках, которая отражает приспособительные механизмы отдельных генотипов к лимитирующим факторам окружающей среды [1, 2].

Исследования параметров листьев в популяциях *Betula pendula* Roth. показали, что с усилением аридности климата увеличивались толщина и плотность листа, что способствовало функциональным изменениям листового аппарата. Данные параметры предложили использовать как маркерные признаки, отражающие адаптацию фотосинтетического аппарата к изменению климатических условий [3]. Содержание хлорофилла в листьях также зависит от величины влагообеспеченности и используется как показатель отзывчивости на увлажнение и устойчивость к засухе [4, 5]. Достоверное снижение фотосинтетической активности под влиянием засухи и засоления было отмечено у geno-

типов пшеницы [6]. Сравнение реакции сортов овса на почвенную засуху также проводили с учетом изменения хлорофиллового индекса [7].

Использование современных технологий и лабораторных методов скрининга стрессоустойчивых генотипов в последнее время становится альтернативным и эффективным способом получения потенциально улучшенного селекционного материала. Многие исследования подтверждают сопоставимость результатов тестирования растительных тканей *in vivo* и *in vitro*, которые позволяют определить критерии отбора устойчивых растений и ускорить реализацию селекционных программ [8]. Скрининг растений, культивируемых *in vitro*, на засухоустойчивость с применением различных стресс-индуцирующих агентов описан во многих исследованиях [9].

Цель исследований – оценка влияния моделируемого осмотического стресса в культуре *in vitro* на морфофизиологические и анатомические показатели листового аппарата отобранных генотипов древесно-кустарниковых растений.

Объекты и методы. Работа проводилась на базе лаборатории биотехнологий ФНЦ агроэкологии РАН в 2023–2024 гг. Объектами исследований были выбраны три вида древесно-кустарниковых растений, перспективных в условиях засушливого климата: *Cotinus coggygria* Scop. (скупия кожевенная) – небольшое листовое дерево или крупный кустарник; карликовый подвой для косточковых *Prunus fruticosa* × *Prunus*

serrulata var. *Lannesiana* (cv. *Prunus* VSL 2); *Caragana pugnata* L. (карагана карликовая) – кустарник 0,5–1 м, чаще всего встречается на песчаных участках и каменистых склонах.

Условия засухи смоделированы с использованием неионного осмотика полиэтиленгликоля с молекулярной массой 6000 (ПЭГ). Лабораторные испытания показали, что критической концентрацией ПЭГ в питательной среде являлась 60 г/л, что подтверждается и на других объектах [10]. Для культивирования микропобегов исследуемых растений использовали питательную среду по протоколу Мурасиге и Скуга (MS) без добавления гормонов. После 45 дней анализировали морфометрические показатели листовых пластин (площадь, масса, наличие увядания, скручивания или хлороза). Для оценки устьичного аппарата листьев проводили микроскопирование отделенной от мезофилла нижней эпидермы листа. Содержание пигментов в листьях (хлорофилла и каротиноидов) у регенерантов на культуральной среде с ПЭГ 60 г/л по сравнению с контролем (среда MS без ПЭГ) определяли при помощи спектрофотометра SPECTROstarNANO по ранее апробированной методике [11].

Обработку полученных результатов проводили при помощи пакета MS Excel. Достоверность различий определяли с помощью критерия Манна-Уитни ($p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение. ПЭГ-индуцированный водный дефицит в питательной среде оказывал ингибирующее действие на ростовые процессы всех исследуемых видов. Однако характер изменений носил видоспецифичные реакции. Все экспланты *C. coggygia* и *Prunus* VSL 2 после 8 недель культивирования на среде с ПЭГ 60 г/л были жизнеспособны, несмотря на отсутствие процессов ризогенеза. Для регенерантов *C. pugnata* отличительной чертой являлось наличие слаборазвитой корневой системы у 45 % микропобегов в условиях осмотического стресса, которые оставались жизнеспособными, неукорененные экспланты погибли. На 7–14-е сутки у эксплантов *C. coggygia* и *C. pugnata* наблюдался хлороз листовых пластин и в некоторых случаях их опадение, при этом происходило формирование новых листочков (рис. 1). У регенерантов *C. coggygia* они имели более темную окраску и плотность, для *C. pugnata* листочки сильно сближенные, на концах черешков отличались признаками витрификации.

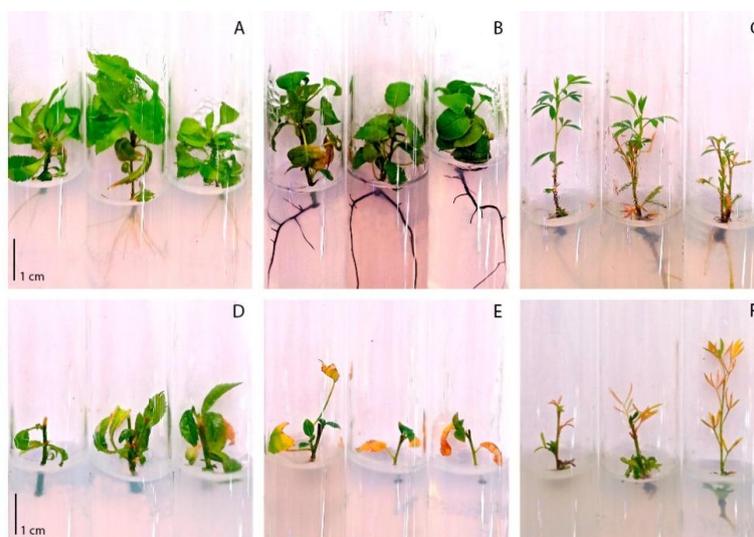


Рис. 1. Микропобеги исследуемых видов после 7 недель культивирования: А – *Prunus* VSL 2 на среде MS, контроль; В – *Cotinus coggygia* на среде MS, С – *Caragana pugnata* на среде MS, контроль; D – *Prunus* VSL 2, ПЭГ 60 г/л; E – *Cotinus coggygia*, ПЭГ 60 г/л; контроль; F – *Caragana pugnata*, ПЭГ 60 г/л

Micro shoots of the studied species after 7 weeks of cultivation:

- A – *Prunus* VSL 2 on MS environment, control; B – *Cotinus coggygia* on MS environment, C – *Caragana pugnata* on MS medium, control; D – *Prunus* VSL 2, PEG 60 g/l; E – *Cotinus coggygia*, PEG 60 g/l; control; F – *Caragana pugnata*, PEG 60 g/l

Для микропобегов *Prunus* VSL 2 было характерно скручивание листовых пластин и потеря упругости, что обычно способствует предотвращению обезвоживания [12]. Образование новых листьев практически отсутствовало, хлорофил присутствовал частично, по краям листовых пластин первичных эксплантов (см. рис. 1, D).

Листья *C. coggygia* и *Prunus* VSL 2 очередные, простые, с примерно одинаковыми значениями площади листовых пластин на питательной среде без добавления осмотика (табл. 1). После культивирования на среде с ПЭГ 60 г/л у

C. coggygia площадь листовых пластин уменьшилась в 3,8 раза и составила 9,79 мм², для листьев *Prunus* VSL 2 снижение данного показателя было незначительное в – 1,2 раза по сравнению с контролем, что объясняется обновлением листовых пластин у *C. coggygia*, вновь сформированные были значительно мельче, а у *Prunus* VSL 2 происходило постепенное скручивание листьев, что незначительно повлияло на уменьшение площади. Прямая зависимость от значений площади листовых пластин была характерна и для изменения их массы.

Таблица 1

Параметры листовых пластин *Cotinus coggygia* и *Prunus* VSL 2
Parameters of *Cotinus coggygia* and *Prunus* VSL 2 leaf plates

Показатель	<i>Cotinus coggygia</i>		<i>Prunus</i> VSL-2	
	Контроль	ПЭГ 60 г/л	Контроль	ПЭГ 60 г/л
Площадь листовой пластины, мм ²	37,53±3,34 a	9,79±1,11 b	43,25±4,06 a	35,56±3,65 b
Масса листовой пластины, мг	5,64±0,35 a	1,25±0,09 b	6,46±0,55 a	4,17±0,59 b
Кол-во устьичных клеток, шт/0,1 мм ²	36,24±2,55 b	46,04±2,58 a	21,79±1,39 b	26,99±1,57 a

Примечание. В таблице представлены средние значения ± ошибка среднего, различные буквы (здесь и далее) между контролем и ПЭГ 60 г/л означают статистические различия, согласно критерию Манна-Уитни, при $p < 0,05$.

Микроскопирование нижней эпидермы листьев у всех трех видов позволило оценить особенности устьичного аппарата и его изменения при осмотическом стрессе. Формирование и развитие устьиц в листовых пластинках является генетически регулируемым процессом, но плотность устьиц, их размер и форма являются гибкой системой адаптации растений к различным факторам окружающей среды [12]. Несмотря на индивидуальные особенности размеров и расположения устьичных клеток у исследуемых видов, в условиях моделируемой засухи характерными чертами для всех листовых пластин было уменьшение размеров устьичных клеток, полное или частичное смыкание устьичной щели, но при этом общее количество устьиц возрастало (рис. 2). Лист с множеством мелких устьиц может снизить потенциальную проводимость и повысить эффективность использования воды [13].

На рисунке 2 (А–С) наглядно представлено постепенное уменьшение размеров устьиц и смыкание устьичных щелей *Prunus* VSL 2 при

длительном воздействии осмотического стресса в культуре *in vitro*. Для данного вида характерны крупные устьица (см. рис. 2, D) площадью 553,3 мкм², с открытыми устьичными щелями на контрольной среде, после культивирования на среде с ПЭГ площадь устьиц сократилась в 2 раза, а площадь устьичной щели после 8 недель ПЭГ-индуцированного стресса уменьшилась в 8,5 раза, некоторые из них были практически закрыты (см. рис. 2, С; рис. 3). Листья *C. coggygia* отличались самыми маленькими по площади устьицами при их высокой плотности, которые уменьшались в 1,4 раза под действием осмотического стресса. Устьичная щель смыкалась в 2,4 раза, что в 3,5 раза меньше, чем у *Prunus* VSL 2, и в 6,3 раза меньше, чем у *C. rugosa*. Равномерное распределение на внутренней поверхности листа устьиц площадью 321,9 мкм², которая уменьшилась как и у *C. coggygia*, в 1,4 раза под влиянием ПЭГ, и смыкание устьичной щели в 15,8 раза были характерны для *C. rugosa* (см. рис. 2, F; рис. 3).

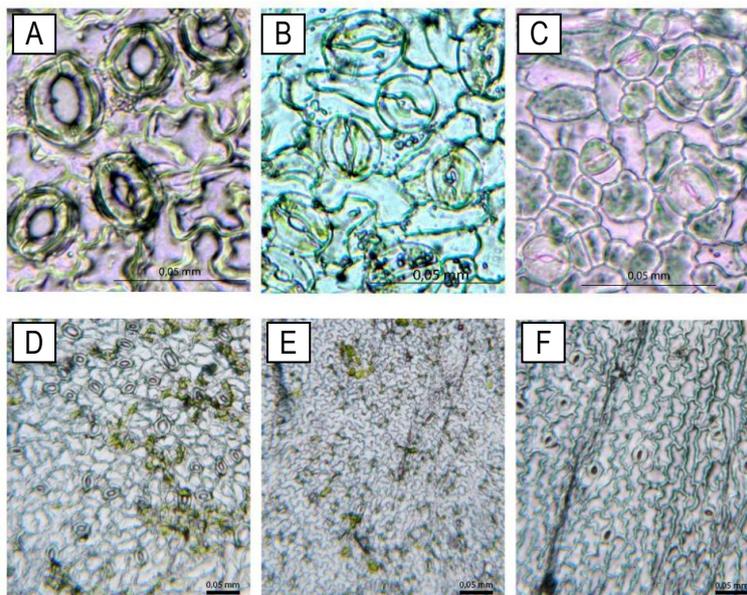


Рис. 2. Устьичные клетки при микроскопировании нижней эпидермы листьев:
 А–С – смыкание устьичной щели у *Prunus VSL 2* на контроле (А), через 4 недели культивирования на ПЭГ 60 г/л (В), через 8 недель культивирования на ПЭГ 60 г/л (С); D – устьичные клетки *Prunus VSL 2*, контроль; E – устьичные клетки *Cotinus coggygria*, контроль; F – устьичные клетки *Caragana pygmaea*, контроль

Stomatal cells during microscopy of the lower epidermis of leaves:
 A–C – closure of the stomatal fissure in *Prunus VSL 2* on control (A), after 4 weeks of cultivation on PEG 60 g/l (B), after 8 weeks of cultivation on PEG 60 g/l (C); D – stomatal cells of *Prunus VSL 2*, control; E – stomatal cells of *Cotinus coggygria*, control; F – stomatal cells of *Caragana pygmaea*, control

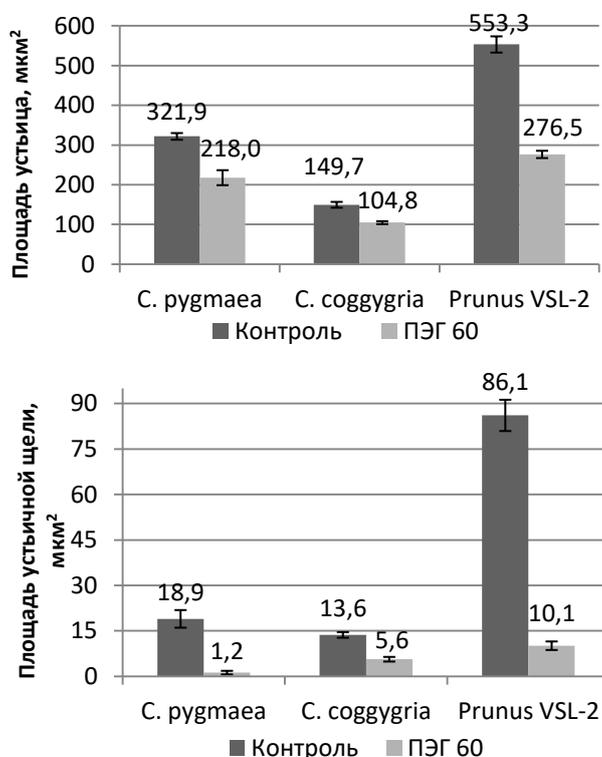


Рис. 3. Характеристика устьичных клеток при моделировании осмотического стресса в культуре *in vitro*

Characterization of stomatal cells during osmotic stress modeling in *in vitro* culture

Сравнительный анализ содержания пигментов, влияющих на работу фотосинтетической системы, в контрольной группе и подверженных осмотическому стрессу листовых пластинах трех изученных видов позволил определить зависимость между этим показателем и толерантностью к моделируемой засухе *in vitro*. В листовых пластинах *C. coggygia* количество общего хлорофилла под влиянием ПЭГ возросло в 1,9 раза по сравнению с контролем, статистически значимые различия содержания кароти-

ноидов отсутствовали (табл. 2). Такие изменения говорят об успешной адаптации сформированных под влиянием осмотического стресса листовых пластинок, меньших по площади, утолщенных, с высокой плотностью небольших по размеру устьиц, что в совокупности обеспечило стабильную работу фотосинтетического аппарата и способность адаптироваться к условиям водного дефицита. Такие же изменения претерпевали и некоторые другие виды в условиях осмотического стресса [7, 10, 14].

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов в листовых пластинах
The content of photosynthetic pigments in leaf plates

Вид	Концентрация ПЭГ в среде	Общий хлорофилл, мкг/см ²	Каротиноиды, мкг/см ²
<i>Caragana pugnata</i>	Контроль, 0 г/л	13,80±2,72 а	3,13±0,60 а
	ПЭГ 60 г/л	5,36±1,03 b	1,19±0,20 b
<i>Cotinus coggygia</i>	Контроль, 0 г/л	12,14±0,55 b	1,59±0,12 а
	ПЭГ 60 г/л	22,85±1,90 а	3,78±0,39 а
<i>Prunus VSL-2</i>	Контроль, 0 г/л	13,97±1,27 а	1,89±0,22 b
	ПЭГ 60 г/л	20,18±2,48 а	3,15±0,39 а

Скручивание листьев *Prunus VSL-2* и наличие признаков хлороза по краю способствовали увеличению содержания каротиноидов в 1,6 раза по сравнению с контролем. Содержание общего хлорофилла было выше, чем на контроле, статистически значимые различия отсутствовали, что характеризует отсутствие изменений в работе фотосинтетического аппарата. У *C. pugnata* листья парноперистые, выглядят как пальчатые, в культуре *in vitro* очень мелкие, большая часть была подвержена хлорозу, что затрудняло работу. Осмотический стресс оказал ингибирующее действие на содержание общего хлорофилла, который снизился в 2,5 раза по сравнению с контролем. Концентрация каротиноидов также была меньше. Общее снижение содержания фотосинтетических пигментов характеризует низкую адаптацию листового аппарата к условиям осмотического стресса у *C. pugnata*.

Полученные данные позволяют оценить адаптивный потенциал листовых пластинок изученных видов в условиях осмотического стресса и спрогнозировать ответную реакцию растений на засуху. *C. coggygia* и *Prunus VSL-2* обладают высокой способностью адаптироваться к моделируемой засухе, *C. pugnata* более чувствительна к водному дефициту.

Закключение. Осмотический стресс в культуре *in vitro*, индуцированный полиэтиленгликолем, оказывал ингибирующее действие на ростовые процессы микропокогов всех изученных видов. Общие изменения в листовых пластинах проявлялись в уменьшении размеров устьичных клеток, полном или частичном смыкании устьичной щели и более высокой плотности устьиц. Для *C. coggygia* характерными признаками адаптации к водному дефициту являются хлороз, опадение листьев первичного экспланта и формирование новых, меньших по площади листовых пластинок, утолщенных, с погруженными устьицами. У микропокогов *Prunus VSL-2* листья скручивались, проявлялся хлороз по краю, новые листья практически не формировались, происходило смыкание устьичной щели. При культивировании на питательных средах, дополненных ПЭГ 60 г/л, выжили только способные к ризогенезу регенеранты *C. pugnata*.

В качестве одного из оптимальных критериев отбора более засухоустойчивых генотипов можно использовать показатель содержания хлорофилла в листовых пластинах, отражающий стабильную работу фотосинтетического аппарата. Для *C. pugnata*, после 8 недель культивирования, не все регенеранты были жизнеспособны, и этот показатель был ниже контроля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu W., Zheng L., Qi D. Variation in leaf traits at different altitudes reflects the adaptive strategy of plants to environmental changes // *Ecology and Evolution*. 2020. Vol. 10, № 15. P. 8166–8175. DOI: 10.1002/ece3.6519. EDN: VFGZTT.
2. Кузнецова Т.А. Адаптационные изменения листовой поверхности *Ribes nigrum* L. в зависимости от различных условий водообеспеченности // *Региональные геосистемы*. 2015. Т. 31, № 9. С. 29–36. EDN: UHUPMP.
3. Мигалина С.В., Иванов Л.А., Иванова Л.А. Изменение функциональных параметров листьев видов р. *Betula* вдоль градиента аридности климата в Южной Сибири и Монголии // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2019. Т. 18, № 1. С. 516–519. DOI: 10.14258/pbssm.2019108. EDN: PXQHBW.
4. Газе В.Л., Голубова В.А., Лобунская И.А. Развитие листового аппарата растений и содержание хлорофилла как показатель отзывчивости на увлажнение и устойчивости к засухе образцов озимой мягкой пшеницы // *Зерновое хозяйство России*. 2021. № 6(78). С. 9–14. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-78-6-9-14. EDN: NWDFDL.
5. Ткачев Е.Н., Цуканова Е.М. Методы мониторинга результатов воздействия абиотических стрессоров в насаждениях яблони // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33, № 2. С. 17–21. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10205. EDN: ZBALRJ.
6. Ступко В.Ю., Зобова Н.В., Гаевский Н.А. Сравнение методов скрининга реакции листового аппарата пшеницы на устойчивость к осмотическому стрессу // *Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental*. 2018. № 8. С. 733–737. DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-733-737. EDN: XWSEYX.
7. Еремин Д.И., Любимова А.В., Еремина Д.В. Оценка сортовой реакции овса на почвенную засуху по хлорофилловому индексу // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 11. С. 87–97. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-11-87-97. EDN: KXSDMV.
8. Terletskaia N., Kurmanbayeva M., Erezhetova U. Morphophysiological and Photosynthetic Reactions of Wheat (*T. aestivum* L.) and Its Wild Congeners to Drought Condition *In Vivo* and *In Vitro* // *Recent Advances in Grain Crops Research*. IntechOpen. 2019. P. 45–73. DOI: 10.5772/intechopen.86340.
9. Razavizadeh R., Farahzadianpoor F., Adabavazeh F., et al. Physiological and morphological analyses of *Thymus vulgaris* L. *in vitro* cultures under polyethylene glycol (PEG)-induced osmotic stress // *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant*. 2019. Vol. 55. P. 342–357. DOI: 10.1007/s11627-019-09979-1. EDN: GKDMZK.
10. Vuksanović V., Kovacevic B., Orlovic S., et al. The influence of drought on growth and development of white poplar shoots *in vitro* // *Topola*. 2019. № 203. P. 13–18.
11. Staruhina A.O., Popova A.S., Zaitsev V.G. The Quantification of Chlorophylls and Carotenoids in the Same Sample of an Individual Condition Assessment of Agricultural Plant's Seedlings // *Scientific Agronomy Journal*. 2021. № 2 (113). P. 18–22. DOI: 10.34736/FNC.2021.113.2.002.18-22. EDN: BTRJQX.
12. Zuch D.T., Doyle S.M., Smith R.S., et al. Cell biology of the leaf epidermis: Fate specification, morphogenesis, and coordination // *The Plant Cell*. 2022. № 34(1). P. 209–227. DOI: 10.1093/plcell/koab250. EDN: VZIXDK.
13. Fraser L.H., Greenall A., Carlyle C., et al. Adaptive phenotypic plasticity of *Pseudoroegneria spicata*: response of stomatal density, leaf area and biomass to changes in water supply and increased temperature // *Annals of Botany*. 2009. Vol. 103, № 5. P. 769–775. DOI: 10.1093/aob/mcn252.
14. Erst A.A., Karakulov A.V. Drought tolerance of ornamental Poplar forms cultured *in vitro* // *Contemporary Problems of Ecology*. 2023. Т. 16, № 3. P. 339–345. DOI: 10.1134/S1995425523030058. EDN: SZFWEB.

References

1. Liu W, Zheng L, Qi D. Variation in leaf traits at different altitudes reflects the adaptive strategy of plants to environmental changes. *Ecology and Evolution*. 2020;10(15):8166–8175. DOI: 10.1002/ece3.6519. EDN: VFGZTT.

2. Kuznetsova TA. Adaptations of the leaf surface of black currants depending on the conditions of water supply. *Regional Geosystems*. 2015;31(9):29–36. EDN: UHUPMP.
3. Migalina SV, Ivanov LA, Ivanova LA. Changes in leaf functional parameters of species from genus *Betula* along the gradient of climate aridity in Southern Siberia and Mongolia. *Problems of botany of South Siberia and Mongolia*. 2019;18(1):516–519. DOI: 10.14258/pbssm.2019108. EDN: PXQHBW.
4. Gaze VL, Golubova VA, Lobunskaya IA. Leaf surface index as an indicator of moisture responsiveness and drought resistance of winter bread wheat samples. *Grain Economy of Russia*. 2021;6:9–14. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-78-6-9-14. EDN: NWDFDL.
5. Tkachev EN, Tsukanova EM. Methods for Monitoring the Effects of Abiotic Stressors in Apple Tree Plantings. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2019;33(2):17–21. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10205. EDN: ZBALRJ.
6. Stupko VYu, Zobova NV, Gayevsky NA. Comparison of screening study methods of wheat leaf response to the osmotic stress. *Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental*. 2018;8:733–737. DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-733-737. EDN: XWSEYX.
7. Eremin DI, Lubimova AV, Eremina DV. Evaluation of the oats varietal reaction to soil drought by the chlorophyll index. *Bulletin of KSAU*. 2023;11:87–97. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-11-87-97. EDN: KXS DMV.
8. Terletsкая N, Kurmanbayeva M, Erezhetova U. Morphophysiological and Photosynthetic Reactions of Wheat (*T. aestivum* L.) and Its Wild Congeners to Drought Condition *In Vivo* and *In Vitro*. *Recent Advances in Grain Crops Research. IntechOpen*. 2019. P. 45–73. DOI: 10.5772/intechopen.86340.
9. Razavizadeh R, Farahzadianpoor F, Adabavazeh F, et al. Physiological and morphological analyses of *Thymus vulgaris* L. *in vitro* cultures under polyethylene glycol (PEG)-induced osmotic stress. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant*. 2019;55:342–357. DOI: 10.1007/s11627-019-09979-1. EDN: GKDMZK.
10. Vuksanović V, Kovacevic B, Orlovic S, et al. The influence of drought on growth and development of white poplar shoots *in vitro*. *Topola*. 2019;203:13–18.
11. Staruhina AO, Popova AS, Zaitsev VG. The Quantification of Chlorophylls and Carotenoids in the Same Sample of an Individual Condition Assessment of Agricultural Plant's Seedlings. *Scientific Agronomy Journal*. 2021;2:18–22. DOI: 10.34736/FNC.2021.113.2.002.18-22. EDN: BTRJQX.
12. Zuch DT, Doyle SM, Smith RS, et al. Cell biology of the leaf epidermis: Fate specification, morphogenesis, and coordination. *The Plant Cell*. 2022;34:209–227. DOI: 10.1093/plcell/koab250. EDN: VZIXDK.
13. Fraser LH, Greenall A, Carlyle C, et al. Adaptive phenotypic plasticity of *Pseudoroegneria spicata*: response of stomatal density, leaf area and biomass to changes in water supply and increased temperature. *Annals of Botany*. 2009;103(5):769–775. DOI: 10.1093/aob/mcn252.
14. Erst AA, Karakulov AV. Drought tolerance of ornamental Poplar forms cultured *in vitro*. *Contemporary Problems of Ecology*. 2023;16(3):339–345. DOI: 10.1134/S1995425523030058. EDN: SZFWEB.

Статья принята к публикации 11.03.2025 / The article accepted for publication 11.03.2025.

Информация об авторах:

Ольга Олеговна Жолобова¹, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией биотехнологий, кандидат биологических наук

Татьяна Васильевна Терещенко², младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий

Information about the authors:

Olga Olegovna Zholobova¹, Leading Researcher, Head of the Biotechnology Laboratory, Candidate of Biological Sciences

Tatyana Vasilievna Tereshchenko², Junior Researcher, Biotechnology Laboratory