

Табл. 1. Краткая информация о коллекции некоторых ксерофитных бромелиевых (продолжение)

|                               |               |                         |                 |                      |                |                                                |                                        |
|-------------------------------|---------------|-------------------------|-----------------|----------------------|----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <i>Hechtia</i> 21 (75)        | Hechtioideae  | суккулент               | наземно         | бесцистернов-<br>вый | сухо           | Пустынные и се-<br>зонно засушливые<br>регионы | 60-2550 м, Мексика                     |
| <i>Hohenbergia</i><br>24 (56) | Bromelioideae | суккулент/<br>псаммофит | наземно/ эпифит | цистерновый          | сухо           | Серрадо, Каатинга                              | 0-1600 м, Бразилия                     |
| <i>Neoglaziovia</i><br>1 (3)  | Bromelioideae | суккулент               | наземно         | бесцистерно-<br>вый  | сухо           | Каатинга                                       | С-В. Бразилия                          |
| <i>Ochagavia</i> 1 (4)        | Bromelioideae | ксерофит                | наземно         | промежуточный        | умеренно       | Склерофильный<br>лес субтропической<br>зоны    | 50-1080 м, побережье Центр.<br>Чили    |
| <i>Orthophytum</i><br>5 (53)  | Bromelioideae | суккулент               | наземно         | промежуточный        | сухо           | Каатинга                                       | 250-700 м, Бразилия                    |
| <i>Puya</i> 15 (226)          | Puyoideae     | ксерофит/<br>пиксифит   | наземно         | бесцистерно-<br>вый  | сухо<br>влажно | Анды                                           | 0-4050 м, Анды Юж. и Центр.<br>Америки |

\* Число после рода обозначает количество таксонов в коллекции, в скобках – всего известных науке видов

УДК 634.775.4+581.19 (477.75)

# АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС НАТУРАЛИЗОВАВШИХСЯ В КРЫМУ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *OPUNTIA* (TOURN.) MILL.

Наталья Александровна БАГРИКОВА<sup>1</sup>, Надежда Александровна ГОЛУБКИНА<sup>2</sup>,  
Татьяна Сергеевна НАУМЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, Ялта

<sup>2</sup> Федеральный научный центр овощеводства, Московская обл.

e-mail: nbagrik@mail.ru

## ANTIOXIDANT STATUS OF *OPUNTIA*(TOURN.) MILL., NATURALIZED IN THE CRIMEA

Natalia A. BAGRIKOVA<sup>1</sup>, Nadezhda A. GOLUBKINA<sup>2</sup>, Tanyana S. NAUMENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nikita Botanic Gardens – National scientific Center of RAS, Yalta

<sup>2</sup> Federal Scientific Vegetable Center, Moscow region

**Аннотация.** Представители рода *Opuntia* широко используются в пищевой промышленности и традиционной медицине, отличаются высокими адаптационными способностями к неблагоприятным условиям окружающей среды. Впервые проведена оценка антиоксидантного статуса 6 представителей рода *Opuntia*, натурализовавшихся на территории Крымского полуострова. Показана взаимосвязь между общей антиоксидантной активностью, содержанием полифенолов, пролина, моносахаров и селена. Установлена взаимосвязь указанных показателей с накоплением малонового диальдегида.

**Ключевые слова:** опунция, антиоксиданты, Крымский полуостров

**Abstract.** Representatives of the genus *Opuntia* are widely used in the food industry and traditional medicine and are notable for their high adaptability to adverse environmental conditions. The antioxidant status of 6 representatives of the genus *Opuntia* naturalized in the territory of the Crimean Peninsula was evaluated for the first time. A relationship between the components of total antioxidant activity, the content of polyphenols, proline, monosaccharides and selenium was shown. The correlation between these indicators and accumulation of malonic dialdehyde was established.

**Keywords:** *Opuntia*, antioxidants, Crimean peninsula

**Введение.** Род *Opuntia* Mill. является одним из крупнейших в семействе Cactaceae Juss., включает по данным разных авторов от 90 до 250 видов. Представители рода произрастают в естественном ареале в засушливых и полусухих районах Южной и Северной Америки, Мексики, Западной Индии, Галапагосских островов и др., широко используются как декоративные, пищевые, лекарственные растения. Благодаря богатому химическому составу опунция проявляет антиоксидантные, противораковые, кардиопротекторные, антидиабетические и нейропротекторные свойства.

Высокое содержание антиоксидантов, включая феруловую кислоту, рутин, изорамнетин, а также бетлаиновые пигменты и бета-каротин в плодах, пищевые волокна, полисахариды, пектин, белки и значительное количество минеральных веществ в кладодиях делает опунции уникальным источником биологически активных соединений для человека. Отличительной особенностью опунций является их высокая устойчивость к неблагоприятным условиям окружающей среды: дефициту влаги, засухе, повышенной радиации и высоким температурам, а также к дефициту питательных веществ в почве (Barba et al., 2020; Ramadan et al., 2021; Martins et al., 2023).

Природные условия Крымского полуострова благоприятны для натурализации многих видов растений, среди которых выделяются суккуленты, относящиеся к семействам Cactaceae, Crassulaceae. Восемь представителей рода *Opuntia* адаптировались к условиям вторичного ареала в Крыму. Из них *O. humifusa* (Raf.) Raf. - наиболее распространенный вид, отмечается во всех природных зонах полуострова, *O. engelmannii* Salm-Dyck var. *lindheimeri* (Engelm.) U. Guzman & Mandujano широко распространена на Южном берегу Крыма, *O. fragilis* (Nutt.) Haw., *O. macrorhiza* Engelm., *O. polyacantha* Haw. имеют локальное распространение на южном побережье Крыма, а *O. phaeacantha* Engelm. f. *rubra* Späth. натурализовалась только в юго-восточной части полуострова на территории Карадагского природного заповедника и его окрестностей (Багрикова, Перминова, 2022).

Уровень защиты растительного организма от оксидантного стресса отражают многие биохимические показатели. Интегральным показателем антиоксидантного статуса растения является общая антиоксидантная активность. Малоновый альдегид (МДА) является важнейшей характеристикой уровня перекисного окисления липидов. Пролин защищает растения от различного вида стрессов и способствует более быстрой регенерации после воздействия стресса (Dag et al., 2016). Полифенолы являются наиболее мощными антиоксидантами растений (Голубкина и др., 2020). Сахара влияют на все стадии жизненного цикла растений, взаимодействуют с сигнальными молекулами, контролируют рост и развитие растений, повышают иммунитет (Jeandet et al., 2022). Кроме того, значительную роль в антиоксидантной защите растений играет микроэлемент селен (Голубкина, Папазян, 2006).

**Материалы и методы.** На основании анализа образцов шести натурализовавшихся в Крыму представителей рода *Opuntia*, собранных в 2022 г., дана оценка антиоксидантного статуса и выявлена адаптационная способность представителей рода *Opuntia* к условиям произрастания во вторичном ареале на территории Крымского полуострова. Антиоксидантный статус растений (общая антиоксидантная активность, содержание полифенолов и селена) устанавливали по общепринятым методикам на сухом материале (Голубкина и др., 2020), содержание водорастворимого белка – по Брэдфорду (Bradford, 1976), малонового диальдегида – колориметрически (Heath, Parker, 1968), пролина – с использованием нингидрина (Ábrahám et al., 2010). Статистическая обработка выполнена с использованием программы MS Excel 10.

**Результаты.** Проведенный биохимический анализ выявил значительные межвидовые различия в содержании всех показателей антиоксидантной защиты, а также взаимосвязь между ними (табл. 1, рис. 1).

Максимальное количество малонового диальдегида выявлено у *O. phae-*

**Табл. 1.** Биохимические показатели опунций, натурализовавшихся в Крыму

| Характеристики        | Изученные виды                        |                    |                      |                    |                       |                                               |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
|                       | <i>O. phaeacantha</i> f. <i>rubra</i> | <i>O. fragilis</i> | <i>O. macrorhiza</i> | <i>O. humifusa</i> | <i>O. polyacantha</i> | <i>O. engelmannii</i> var. <i>lindheimeri</i> |
| MDA, мкМ/г с.м.       | 0.490 a                               | 0.413 a            | 0.285 b              | 0.244 bc           | 0.234 c               | 0.212 c                                       |
| Pro, мг/г с.м.        | 0.91 b                                | 0.69 c             | 0.91 b               | 1.44 a             | 1.30 a                | 1.40 a                                        |
| AOA, мг-экв ГК/г с.м. | 33.9 a                                | 16.8 b             | 16.6 b               | 17.5 b             | 13.4 c                | 17.1 b                                        |
| TP, мг-экв. ГК/г с.м. | 20.0 a                                | 10.0 b             | 11.7 b               | 10.2 b             | 10.6 b                | 12.4 b                                        |
| Se, мкг/кг с.м.       | 105 c                                 | 102 c              | 132 b                | 143 b              | 149 b                 | 176 a                                         |
| WSP, мг/г с.м.        | 38.9 a                                | 35.7 a             | 24.8 b               | 25.5 b             | 17.8 c                | 19.2 c                                        |
| Моносахара (MS), %    | 9.4 c                                 | 12.0 b             | 8.1 c                | 16.0 a             | 14.3 b                | 14.2 b                                        |
| Общий сахар, %        | 15.5 c                                | 20.0 b             | 25.4 a               | 29.7 a             | 25.0 a                | 26.5 a                                        |
| WSC, мг/кг с.м.       | 42.7 b                                | 62.1 a             | 34.1 c               | 36.2 c             | 26.5 d                | 60.9 a                                        |
| Нитраты, мг/кг с.м.   | 1.8 b                                 | 2.8 a              | 1.2 c                | 1.8 b              | 1.0 c                 | 2.3 a                                         |

MDA – малоновый диальдегид, Pro – пролин, AOA – общая антиоксидантная активность, TP – общее содержание полифенолов, WSP – водорастворимый белок, WSC – водорастворимые соединения. Значения в рядах с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно тесту Дункана при P < 0,05.

*acantha f. rubra*, что может свидетельствовать как о сравнительно невысоком уровне антиоксидантной защиты этого вида, так и о более высоком содержании липидов. Также высоким содержанием МДА характеризуется *O. fragilis*, остальные исследованные виды и разновидности накапливали в среднем в 2 раза более низкие концентрации МДА (табл.). Показательно, что, несмотря на высокие уровни МДА, *O. phaeacantha f. rubra* накапливает максимальное количество полифенолов для поддержания адаптационного потенциала. Логично в связи с этим представляется обратная корреляция между уровнями накопления МДА и содержанием пролина (коэффициент корреляции составил  $r = -0.796$ ,  $P < 0.01$ ). Активное участие других компонентов антиоксидантной защиты опунции проявлялось в мощной отрицательной взаимосвязи МДА и селена ( $r = -0.905$ ,  $P < 0.01$ ), а также положительных взаимосвязях между пролином и селеном ( $r = +0.854$ ), пролином и моносахарами ( $r = +0.704$ ), общей антиоксидантной активности (ОАО) и уровнем накопления полифенола ( $r = +0.957$ ,  $P < 0.01$ ). Интересно, что содержание селена было обратно пропорционально накоплению водорастворимых белков ( $r = -0.910$ ), а содержание последних напрямую связано с накоплением малонового диальдегида ( $r = +0.962$ ). В целом сложные взаимосвязи между биохимическими показателями опунции могут быть представлены следующей схемой.

Более высокие значения содержания пролина, сахаров и селена у *O. humifusa*, *O. engelmannii* var. *lindheimeri* и *O. polyacantha* защищают растения от различного вида стрессов и способствуют более быстрому восстанов-

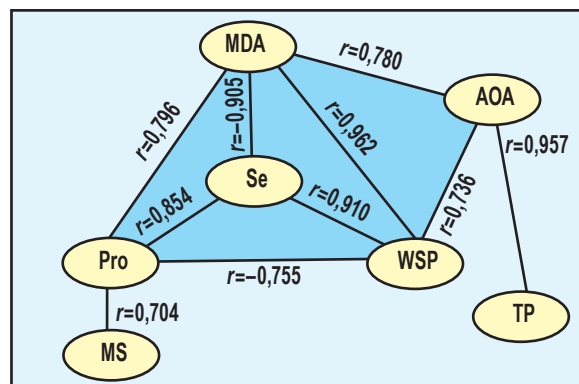


Рис. 1. Корреляционные взаимосвязи между биохимическими показателями натурализованных в Крыму видов опунций

лению после негативного воздействия факторов среды.

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что наибольшие значения содержания пролина (1.40–1.44), сахаров (26.5–29.7) и селена (143–176) обуславливают более широкое распространение *O. humifusa*, *O. engelmannii* var. *lindheimeri* на территории Крымского полуострова, а также их внедрение в естественные сообщества. Полученные данные подтверждают заключение других авторов о влиянии значений биохимических показателей на антиоксидантную защиту растений и их адаптацию к условиям среды.

#### Список литературы

- Багрикова Н.А., Перминова Я.А. Характеристика и распространение натурализовавшихся в Крыму представителей рода *Opuntia* (Cactaceae) // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции, 2022. – Т. 183. № 3. – С. 149-160. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-3-140-148>
- Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Молчанова А.В., Антошкина М.С., Надежкин С.М., Солдатенко А.В. Антиоксиданты растений и методы их определения. М. Инфра-М, 2020. – 181 с.
- Голубкина Н.А., Папаян Т.Т. Селен в питании. Растения, животные, человек. М.: Печатный город, 2006. – 254 с.
- Ábrahám E., Hourton-Cabassa C., Erdei L., Szabados L. Methods for determination of proline in plants. // Methods in Molecular Biology, 2010. – P. 639. [https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_20)
- Barba F.J., Garcia C., Fessard A., Munekeat P.E.S., Lorenzo J.M., Aboudiad A., Ouadiad A., Remize F. Opuntia Ficus Indica Edible Parts: A Food and Nutritional Security Perspective // Food Reviews International, 2020. – 1756844. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1756844>
- Bradford M.M. A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Analytical Biochemistry, 1976. – Vol. 7. – P. 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Dar M.I., Naikoo M.I., Rehman F., Naushin F., Khan F.A. Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development // Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies. Springer, New Delhi. 2016. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1_9)
- Heath R.L., Parker L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // Arch. Biochem. Biophys., 1968. – Vol. 125. – P. 189-198.
- Jeandet P.; Formela-Luboiniska M.; Labudda M.; Morkunas I. The Role of Sugars in Plant Responses to Stress and Their Regulatory Function during Development // Int. J. Mol. Sci., 2022. – Vol. 23. – 5161. <https://doi.org/10.3390/ijms23095161>
- Martins M., Ribeiro M.H., Almeida C.M.M. Physicochemical, nutritional, and medicinal properties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and its main agro-industrial use. A review // Plants, 2023 – Vol. 12. – 1512. <https://doi.org/10.3390/plants12071612>
- Ramadan M.F., Ayoub T.E.M., Rohn S. Opuntia spp.: Chemistry, bioactivity and industrial application. – Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7>