УДК 582.736+615.27+631.445
DOI: 10.25684/2413-3019-2023-14-132-139

АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС АСТРАГАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ

Голубкина Надежда Александровна[1], Лапченко Владимир Александрович[2], Лапченко Елена Витальевна[2], Зайцев Вячеслав Федорович[3], Лактионов Алексей Павлович[4], Пирогов Николай Григорьевич[5], Смирнова Анна Михайловна[1]

1 – Федеральный научный центр овощеводства, Россия,
e-mail: segolubkina45@gmail.com (Н.Г.), annasmirnova28@yandex.ru (А.С.)
2 – Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, Россия,
e-mail: ozon.karadag@gmail.com (В.Л.), elenalapchenko@gmail.com (Е.Л.)
3 – Астраханский технический университет, Россия,
e-mail: viacheslav-zaitsev@yandex.ru
4 – Астраханский государственный университет, Россия,
e-mail: alactionov@list.ru
5 – Богдинско-Баскунчакский природный заповедник, Россия
e-mail: npirogov2017@yandex.ru

Впервые изучен антиоксидантный статус шести видов астрагалов (*Astragalus vulpinus*, *A. physodes*, *A. pseudotataricus*, *A. brachylobus*, *A. dasyanthus*, *A. testiculatus*), произрастающих на территории Богдинско-Баскунчакского природного заповедника, двух видов (*A. inobrychis*, *A. supropilosees* Gontsch), собранных на территории в окрестностях озера Бараколь и одного вида (*A. tragacantha*) – с территории Карадагского природного заповедника. В условиях Богдинско-Баскунчакского природного заповедника выявлена прямая корреляция между содержание пролина, полифенолов и общей антиоксидантной активностью листьев астрагалов: r = + (0,921-0,976) и отрицательная корреляция между МДА и

пролином, полифенолами и общей антиоксидантной активностью: r = - (0,80-0,95). Установлена более высокая антиоксидантная активность, содержания пролина и малонового диальдегида у астрагалов окрестностей соленого озера Бараколь (6,3–9,0 мг/г пролина и 0,495–0,761 мМ/г с.м. МДА) по сравнению со средними значениями, полученными для астрагалов, произрастающих в районе Баскунчака (2,5–5,5 мг/г пролина и 0,251–0,550 мМ/г с.м. МДА. Среди исследованных видов выявлен новый инликатор селена – *Astragalus arnacantha*, способный накапливать от 288 до 2680 мкг Se/кг с.м.в условиях Карадагского природного заповедника.

Ключевые слова: Astragalus, засоление, антиоксидантный статус, пролин, малоновый диальдегид, селен, Астраханская обл., Республика Крым.

Семейство Fabaceae является одним из наиболее обширных растительных таксонов, широко распространенным во всем мире, и отличающимся высоким биоразнообразием, морфологической вариабильностью и значительными уровнями накопления биологически активных соединений (Wang, 2021; Salehi et al., 2020). Среди представителей этого семейства особое внимание уделяется представителям рода *Astragalus*, которые широко используются в китайской медицине (Shahrajabian et al., 2019). характеризуются иммуностимулирующим, противовоспалительным, противораковым, нейро- и гепатопротекторным действием (Graziani et al., 2019). Эти растения успешно используются при упадке сил, анорексии, отеках, абсцессах, насморке, одышке, расстройстве пищеварения, истощении, язвах и сахарном диабета (Auyeung et al., 2016). Астрагалы характеризуются широким разнообразием мест обитания, значительными вариациями в морфологических признаках. Географическое распределение астрагалов включает юго-западную Азию (Иран, Турция, около 1500 видов), юг Центральной Азии (Китайско-Гималайское плато, около 500 видов), Европу (около 130 видов), а также горные районы Африки, восточную часть Северной Америки (500 видов) и Анды Южной Америки (150 видов) (Chaundhary et al., 2008). Среди сосудистых растений это один из крупнейших родов по количеству видов, чрезвычайно разнообразный и таксономически сложный, проявляющий значительную устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды.

Биоразнообразие рода астрагалов отражается в сложном химическом профиле, включающем алкалоиды, производные селена (Sors et al., 2005; Davis, 1972), полисахариды (Zheng et al., 2020), полифенолы и сапонины (Graziani et al., 2019; Bratkov et al., 2016). В связи с многочисленностью представителей рода *Astragalus*, биохимические исследования этих растений до настоящего времени остаются весьма фрагментарными (Graziani et al., 2019; Сергалиева и др., 2018).

Цель настоящей работы – оценить антиоксидантный статус астрагалов, произрастающих в условиях значительного засоления почв на территории Астраханской области и Республики Крым.

Материал и методы

Объектом исследований являлись 9 видов рода *Astragalus,* собранных на территории особо охраняемых природных территорий (Богдинско-Баскунчакский природный заповедник (Астраханская область), Карадагский природный заповедник (Республика Крым), а также в окрестностях озера Бараколь на территории Крымского полуострова. Для выявления особенностей

антиоксидантного статуса астрагалов были собраны образцы других представителей семейства Fabaceae (табл. 1). Образцы растений собирали в июне 2021-2022 гг.

Таблица 1. *Обьекты исследования и места сбора образцов*

Виды	**Место сбора и координаты**
*Astragalus brachylobus*DC.	Астраханская обл., Гора Большое Богдо, Богдинско-Баскунчакский природный заповедник, 48 8.364 N; 46 51.462 E
Astragalus testiculatus Pall.	
Astragalus pseudotataricus Boriss.	
Astragalus physodes L.	
Astragalus vulpinus Willd.	
Astragalus dasyanthus Pall.	
Astragalus onobrychis L.	Республика Крым, Окрестности озера Бараколь, 44°59'57"N; 35°14'08"E
Astragalus supropilosees Gontsch	
Onobrychis miniata Steven	
Melilotus officinalis L.	
Medicago sativa L.	
Medicago glandulosa Davida	
Astragalus tragacantha Mill.	Республика Крым, Карадагский природный заповедник, 44°56′10″ N; 35°14′00″ E

Образцы сушили при комнатной температуре до постоянного веса и гомогенизировали. Содержание селена устанавливали флуорометрически (Alfthan, 1984). Уровень антиоксидантной активности и содержание полифенолов регистрировали согласно общепринятым методам (Голубкина и др., 2020). Уровень пролина определяли спектрофотометрически с использованием нингидрина (Niknam, Ebragimzadeh, 2002). Концентрации малонового альдегида анализировали колориметрически, используя тиобарбитуровую кислоту (Khoubnasabjafari, Jouyban, 2020). Статистическая обработка выполнена с помощью программы MS Excel 10.

Результаты и обсуждение

При исследовании биохимических особенностей растений особое внимание уделяется накоплению аминокислоты пролина, которая синтезируется в растениях в стрессовых условиях и служит важным показателем стрессоустойчивости растений к неблагоприятным факторам окружающей среды. Исследование 23 видов астрагалов Ирана выявило широкий интервал накопления пролина 0,04–0,95% (Niknam, Ebragimzadeh, 2002). Авторы показали, что уровень пролина в значительной степени определяется двумя факторами: генетическими и уровнем оксидантного стресса в конкретном местообитании.

Соленое озеро Баскунчак в Астраханской области является основным источником поваренной соли в стране. Высокая засоленность почв Богдинско-Баскунчакского заповедника открывает уникальную возможность оценки адаптационной способности растений к дефициту влаги. Данные настоящего исследования показали, что для астрагалов, собранных в окрестностях горы Богдо на территории Богдинско-Баскунчакского природного заповедника, вариации в содержании пролина составляют 23,3% при наименьших уровнях, характерных для

A. dasyanthus и наибольших – для редких видов астарагалов*: A. testiculatus* и *A. brachylobus* (табл. 2). Основываясь на данных уровней аккумулирования пролина в астрагалах в одинаковых условиях вегетации, представленные виды по стрессоустойчивости можно расположить в ряд: *A. testiculatus, A. brachylobus* > *A. pseudotaturicus, A. physodes, A. vulpinus* > *A. dasyanthus*). Данные накопления в тканях астрагалов малонового диальдегида – индикатора интенсивности перекисного окисления липидов (Khoubnasabjafari, Jouyban, 2020) находятся в хорошем соответствии с таким распределением, проявляя обратную корреляцию с уровнем накопления пролина (r =-0,941, p<0,001).

Таблица 2. *Антиоксидантный статус астрагалов Богдинско-Баскунчакского природного заповедника*

Вид	**Se,** Мкг/кг с.м.	**АОА,** Мг-экв ГК/г с.м.	**ТР,** Мг-экв ГК/г с.м.	**Пролин,** Мг-экв ГК/г с.м.	**МДА,** мМ/г
A. brachylobus	89 a	36,2 a	17,1 a	5,18 ab	0,297 c
A. testiculatus	110 a	36,1 a	17,5 a	5,50 a	0,251 d
A. pseudotaturicus	116 a	23,8 b	12,0 c	4,14 c	0,432 b
A. physodes	96 a	22,6 b	12,5 bc	4,18 c	0,338 c
A. vulpinus	114 a	22,2 b	14,6 b	4,30 bc	0,317 c
A. dasyanthus	98 a	15,7 c	7,9 d	2,50 d	0,550 a
M±SD	104±11	26,1±8,3	13,6±3,6	4,30±1,00	0,364±0,109
Интервал концентраций	89-116	15,7-36,1	7,9-17,5	2,50-5,50	0,251-0,550
CV, %	10,6	31,8	26,5	23,3	29,9

Примечание. АОА – общая антиоксидантная активность, ТР – общее содержание полифенолов. Значения в столбцах с одинаковыми индексами не различаются статистические согласно тесту Дункана при p<0,05.

Более того, в условиях мощного оксидантного стресса территории Богдинско-Баскунчакского природного заповедника, как нами установлено, уровень адаптации растений непосредственно связан также с антиоксидантным статусом растительного организма и, в первую очередь, с уровнем накопления полифенолов. Действительно, нами впервые установлены статистически значимые обратные корреляции между уровнем накопления малонового диальдегида и содержанием полифенолов – важнейших антиоксидантов растений (r= -0,95; p<0,001), а также обратная корреляция межу содержанием в астрагалах малонового диальдегида и уровнем общей антиоксидантной активности (0,804; p<0,01). Другой природный антиоксидант селен, по-видимому, не участвует напрямую в антиоксидантной защите этих видов астрагалов, которые, согласно полученным данным, не являются аккумуляторами селена. Действительно, при среднем содержании селена в почвах окрестностей горы Большое Богдо 186 мкг/кг сухой массы коэффициент биологического накопления микроэлемента астрагалов во всех случаях был ниже единицы и мало различался между видами. К настоящему времени установлено, что из более чем 2000 видов астрагалов аккумуляторами селена являются не более 200 (Golubkina et al., 2020), однако, подробный мониторинг по этому показателю до настоящего времени не проводился.

Высокий уровень засоления определяет экологический отбор видов, наиболее устойчивых к дефициту влаги. Данные оценки содержания пролина и малонового диальдегида в астрагалах и других представителях семейства Fabaceae, произрастающих в окрестностях соленого озера Бараколь (табл. 3), выявило преобладание на этой территории достоверно более высоких уровней как содержания пролина, так и накопления антиоксидантов, что может свидетельствовать как о более мощном оксидантном стрессе, так и о генетических особенностях исследованных видов. Баракольская котловина с периодически пересыхающим соленым озером Бараколь расположена в 4-х км от поселка Коктебель и является уникальным обьектом адаптации различных видов растений к засолению (Вронский, 1997). Бобовые растения представляют собой группу сравнительно устойчивых к засолению видов. В отличие от результатов исследования астрагалов Богдинско-Баскунчакского природного заповедника, данные антиоксидиантного статуса представителей семейства Fabaceae из окрестностей озера Бараколь свидетельствовали об отсутствии значимой взаимосвязи между показателями общей антиоксидантной активности, содержания полифенолов, пролина и малонового диальдегида, что свидетельствует о важности генетического фактора в установлении уровня антиоксидантной защиты растений. Так же, как и в случае с астрагалами Богдинско-Баскунчакского природного заповедника, исследованные виды растений не проявили себя как аккумуляторы селена. Определенное исключение составил *A. supropilosees*, способный накапливать в 3 раза более высокие уровни селена по сравнению с другими исследованными видами. Среди предствителей бобовых в этих условиях произрастания наименьшие уровни содержания селена оказались характерны для *Medicago glandulosa* (70 мкг/кг с.м.) и *Astragalus onobrychis* (60 мкг/кг с.м.).

Таблица 3. *Биохимические характеристики представителей Fabaceae, произрастающих вблизи соленого озера Бараколь, Республика Крым*

Вид	**Se,** мкг/кг	**АОА,** мг-экв ГК/г с.м.	**ТР,** мг-экв ГК/г с.м.	**Пролин,** мг/г с.м.	**МДА,** мМ/г с.м.
Astragalus onobrychis	60 c	77,2 a	17,2 bc	9,0 b	0,495 b
Astragalus supropilosees	313 a	62,5 a	23,1 a	6,3 c	0,761 a
Onobrychis miniata	86 b	52,0 b	22,3 a	13,4 a	0,473 b
Melilotus officinalis	92 b	31,2 c	18,2 b	14,3 a	0,328 c
Medicago sativa	87 b	31,6 c	15,6 cd	15,3 a	0,323 c
Medicago glandulosa	70 c	35,2 c	14,8 d	7,6	0,235 d
M±SD	153±107	63,9±8,9	20,9±2,4	11,0±3,4	0,576±0,123
Интервал концентраций	60-313	52,0-77,2	17,2-23,1	6,26-15,31	0,473-0,761
CV, %	69,9	13,9	11,5	30,9	21,4

Значения в столбцах с одинаковыми индексами не различаются статистические согласно тесту Дункана при $p<0.05$.

В Крыму насчитывается 34 вида астрагалов, однако, их биохимические характеристики и склонность к аккумулированию селена практически не изучены. Известно, что *Astragalus tragacantha* является хорошо адаптированным видом к засухе и устойчивым к повышенным концентрациям тяжелых металлов (Salducci et al., 2019). Образцы этого вида, собранные в Карадагском природном заповеднике,

характеризовались сходными показателями антиоксидантной активности (44–62 мг-экв ГК/г с.м.) и содержания полифенолов (22–27 мг-экв ГК/г с.м.) с соответствующими показателями астрагалов, собранных в Богдинско-Баскунчакском заповеднике. Место произрастания оказало доминирующее влияние на уровни накопления селена. Выявленный нами интервал концентрации микроэлемента в *A. tragacantha* от 288 до 2680 мкг/кг с.м. свидетельствуют, с одной стороны, о неравномерности распределения селена по территории заповедника, что хорошо согласуется с отдаленными последствиями вулканической деятельности Карадага (Golubkina et al., 2020), с другой, указывает на то, что *A. tragacantha* является важным индикатором селена. Согласно литературным данным в условиях повышенных концентраций селена в окружающей среде астрагалы превращают неорганические формы селена, поступающие из почвы, в органические производные, преимущественно в виде селен содержащих аминокислот и пептидов: селенометил селеноцистеина и гамма-глутамил селенометил селеноцистеина. Оба соединения, согласно современным исследованиям, являются одними из наиболее мощных антиканцерогенов природного происхождения (Rayman, 2005), что свидетельствует об актуальности оценки селен аккумулирующей способности разных видов астрагалов.

Заключение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о важности осуществления биохимического мониторинга видов рода Adstragalus в разных природных условиях с целью выявления закономерностей накопления в них биологически активных соединений и установления новых гипераккумуляторов селена.

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания (№121032300023-7) «Изучение особенностей структуры и динамики сухопутных экосистем в различных климатических зонах».

Литература

Вронский А.А. Курорт Коктебель. – Киев: Наукова Думка, 1997. – 143 с.

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. DOI: 10.12737/1045420

Сергалиева М.У., Барскова Н.А. Астрагал лисий (*A. vulpinus* E. Willd) – источник биологически активных веществ // Фармация и Фармакология. – 2018. – Т. 6(3). – С. 255-268. DOI: 10.19163/2307-9266-2018-6-3-255-268

Alfthan G.V. A micromethod for the determination of selenium in tissues and biological fluids by single-test-tube fluorimetry // Anal. Chim. Acta. – 1984. – Vol. 165. – P. 187-194.

Auyeung K.K., Han Q.B., Ko J.K. *Astragalus membranaceus*: a review of its protection against inflammation and gastrointestinal cancers // Am. J. Chin. Med. – 2016. – Vol. 44. – P. 1-22.

Bratkov V.M., Shkondrov A.M., Zdraveva P.K., Krasteva I.N. Flavonoids from the genus Astragalus: phytochemistry and biological activity // Pharmacogn. Rev. – 2016. – Vol.10(19). – P. 11-32. DOI: 10.4103/0973-7847.176550

Chaudhary L.B., Rana T.S., Anand K.K. Current status of the systematics of *Astragalus* L. (Fabaceae) with special reference to the Himalayan species in India // Taiwania. – 2008. – Vol. 53(4). – P. 338-355. DOI: 10.6165/tai.2008.53(4).338.

Davis A.M. Selenium accumulation in *Astragalus* species // Agronomy J. – 1972. – Vol. 64(6). – P. 751-754. DOI: 10.2134/agronj1972.00021962006400060013x

Golubkina N.A., Lapchenko V.A., Ryff L.E. Lapchenko H.V., Naumenko T.S., Bagrikova N.A., Krainuk K.S., Kosheleva O.V., Caruso G. Medicinal plants as sources of selenium and natural antioxidants // Banat's J. Biotechnol. – 2020. – Vol. 11 (Iss. 22). – P. 48-59. DOI: 10.7904/2068-4738-XI(22)-48

Graziani V., Scognamiglio M., Esposito A., Fiorentino A., D'Abrosca B. Chemical diversity and biological activities of the saponins isolated from Astragalus genus: focus on Astragaloside IV // Phytochem. Rev. – 2019. – Vol. 18. – P. 1133-1166. DOI: 10.1007 /s11101- 019-09626-y

Khoubnasabjafari M., Jouyban A. Challenges on determination of malondialdehyde in plant samples Archives of Crop Science. – 2020. – Vol. 4(1). – P. 64-66. DOI: 10.36959/718/604

Niknam V., Ebrahimzadeh H. Free proline content in *Astragalus* species // Pak. J. Bot. – 2002. – Vol. 34(2). – P. 129-132.

Rayman M.P. Selenium in cancer prevention: a review of the evidence and mechanism of action // Proceedings of the Nutrition Society. – 2005. – Vol. 64. – P. 527-542. DOI: 10.1079/PNS2005467

Salducci M.D., Folzer H., Issartel J., Rabier J., Masotti V., Prudent P., Affre L., Hardion L., Tatoni T., Laffont-Schwob I. How can a rare protected plant cope with the metal and metalloid soil pollution resulting from part industrial activities. Phytometabolites, antioxidant activities and root symbiosis involved in the metal tolerance of *Astragalus tragacantha* // Chemosphere. – 2019. – Vol. 217. – P. 887-896.

Salehi B., Carneiro J.N.P. Astragalus species: Insights on its chemical composition toward pharmacological applications // Phytother. Res. – 2021. – Vol. 35 (5). – P. 2445-2476.

Shahrajabian M.H., Sun W., Cheng Q. Astragalus, an ancient medicinal root in traditional Chinese medicine, a gift from Silk Road // Int. J. Agric. Biol. Sci. – 2019. – P. 27–38.

Sors T.G., Ellis D.R., Na G.N., Lahner B., Lee S., Leustek T., Pickering I.J., Salt D.E. Analysis of sulfur and selenium assimilation in Astragalus plants with varying capacities to accumulate selenium // Plant J. – 2005. – Vol. 42(6). – P. 785-797. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2005.02413.x

Wang G., Wang J., Liu W., Nisar M.F., El-Esawi M.A., Wan C. Biological Activities and Chemistry of Triterpene Saponins from *Medicago* Species: An Update Review // Evid. Based Complement Alternat. Med. – 2021. – Vol. 2021– Article 6617916. DOI: 10.1155/2021/6617916

Zheng Y., Ren W., Zhang L., Zhang Y., Liu D., Liu Y. A Review of the pharmacological action of Astragalus polysaccharide // Front. Pharmacol. – 2020. – Vol. 11. – Article 349. DOI: 10.3389/fphar.2020.00349

Golubkina N.A., Lapchenko V.A., Lapchenko H.V., Zaitsev V.F., Laktionov A.P., Pirogov N.G., Smirnova A.M. **Antioxidant status of Astragalus in conditions of increased soil salinity //** Scientific Notes of the “Cape Martyan” Nature Reserve. – 2023. – Iss. 14. – P. 132-139.

Antioxidant status of 6 *Astragalus* species of high salinity area Bogdinsko-Baskuncha Nature Reserve (*A. vulpinus*, *A. physodes*, *A. bseudotataricus*, *A. brachylobus*, *A. dasyanthus*, *A. testiculatus*), 2 species from the vicinity of salt lake Barakol (*A. onobrychis*, *A. supropilosees*) and 2 species from Karadag Nature Reserve (*A. arnacantha*, *A. tragacantha*) was evaluated for the first time. In conditions of Bogdinsko-Baskunchak Nature Reserve direct correlations between proline and polyphenols (TP) accumulation and total antioxidant activity (AOA) of Astragalus leaves were recorded: r= + (0,921-0,976). Negative correlations between leaves MDA and proline, polyphenols and AOA were also registered: r=-(0,804-0,950). Astragalus from the vicinity of salt-lake Barakol (Crimea) demonstrated higher levels of AOA, proline and MDA (6,3–9,0 mg proline/g and 0,251–0,550 мM MDA/g d.w.) compared to mean values, obtained for Baskunchak plants (2.5–5.5 mg proline/g and 0,495–0,761 мM MDA/g d.w.). Among Astragalus species studied *Astragalus arnacantha* Bieb from Karadag Nature Reserve accumulated up to 2680 µg Se/kg d.w.

Keywords: *Astragalus*, salinity, antioxidant status, proline, malonic dialdehyde, selenium, Astrahanskaya District, Pepublic of the Crimea.