

4. Šamec D., Karalija E., Šola I., Vujčić Bok V., Salopek-Sondi B. The role of polyphenols in abiotic stress response: The influence of molecular structure. *Plants*. 2021, 10(1), 118.
5. Gulcin İ. Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview. *Arch. Toxicol.* 2020, 94, 651–715.
6. Sytařová I., Orsavová J., Snopek L., Mlček J., Byczyński Ł., Mišurcová L. Impact of phenolic compounds and vitamins C and E on antioxidant activity of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries and leaves of diverse ripening times. *Food chemistry*. 2020, 310, 125784.
7. Samanta S. Potential bioactive components and health promotional benefits of tea (*Camellia sinensis*). *J. Am. Nutr. Assoc.* 2022, 41, 65-93.
8. Cosme P.; Rodriguez A.B.; Espino J.; Garrido M. Plant phenolics: Bioavailability as a key determinant of their potential health-promoting applications. *Antioxidants*. 2020, 9, 1263.
9. Zhang S., Zhang L., Zou H., Qiu L., Zheng Y., Yang D., Wang, Y. Effects of light on secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants. *Front. Plant Sci.* 2021, 12, 781236.
10. López-Fernández O., Domínguez R., Pateiro M., Munekata P.E., Rocchetti G., Lorenzo J.M. Determination of polyphenols using liquid chromatography–tandem mass spectrometry technique (LC–MS/MS): A review. *Antioxidants*. 2020, 9(6), 479.
11. Maiuolo J., Gliozzi M., Carresi C., Musolino V., Oppedisano F., Scarano F., Nucera S., Scicchitano M., Bosco F., Macri R. Nutraceuticals and cancer: Potential for natural polyphenols. *Nutrients*. 2021, 13, 3834.
12. Rana A., Samtiya M., Dhewa T., Mishra V., Aluko R.E. Health benefits of polyphenols: A concise review. *J. Food Biochem.* 2022, 46(10), e14264.

Редокс-активные соединения флавановой природы с различной степенью полимеризации в *in vitro* культуре *Camellia sinensis* L. и их роль в стресс-устойчивости

Зубова М. Ю.^{А*}, Нечаева Т. Л.^А, Осипов В. И.^Б, Загоскина Н. В.^А

^А *Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева Российской академии наук, Москва, Россия. *E-mail: mariia.zubova@yandex.ru*

^Б *Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Москва, Россия*

Неотъемлемой составляющей жизнедеятельности растений, а также инициированных из них *in vitro* культур является образование активных форм кислорода (АФК) [1]. Они могут оказывать регуляторную и сигнальную функцию, а при значительном их накоплении приводить к развитию окислительного стресса и даже гибели клеток [2]. Его уровень может быть различным и зависит от многих факторов, включая стадии развития растений (ското- и фотоморфогенез), условия их выращивания (свет, фотопериод, интенсивность, УФ и др.) и экзогенные воздействия (температура, рН, минеральные вещества и др.) [3].

Важная роль в защите растений от действия АФК принадлежит антиоксидантной системе основными компонентами которой являются высокомолекулярные и низкомолекулярные антиоксиданты [1]. К числу последних относятся такие редокс-активные вещества как фенольные соединения (ФС) [4]. Благодаря своим химическим свойствам они легко взаимодействуют с АФК, тем самым снижая их токсическое действие на клетки. Высокая антиоксидантная активность ФС служит предметом многочисленных исследований и не только специалистов в области физиологии и биохимии растений, но также медиков и фармацевтов. В значительной степени этот интерес обусловлен тем, что эти растительные биоантиоксиданты сохраняют биологическую активность при поступлении в организм человека по пищевым цепям [5].

В настоящее время ареал произрастания и численность растительных сообществ часто ограничены и даже находятся под угрозой исчезновения, что не позволяет реализовать коммерческие масштабы их применения и вызывает необходимость использования других технологических подходов при получении растительного сырья. К их числу относятся биотехнологические методы, обеспечивающие непрерывное, экономически выгодное производство для пищевой и фармакологической индустрии, а также нутрицевтической сферы [6]. И в этом случае культура клеток и тканей растений может рассматриваться в качестве основной платформы для получения вторичных метаболитов, в том числе ФС. Для нее характерны следующие преимущества: рост в контролируемых условиях; отсутствие ограничений в действии сезонных, климатических и географических факторов; сохранение способности к образованию характерных для интактных растений метаболитов и возможность модуляции их биосинтеза различными экзогенными воздействиями [7,8].

Растения чая (*Camellia sinensis* L.) являются уникальным объектом, поскольку способны накапливать фенольные биоантиоксиданты в большом количестве [9]. К их числу относятся флаваны – основные представители его фенольного комплекса, представленные мономерными (катехины) и олигомерными (проантоцианидины) формами. Именно они обуславливают ценные свойства, получаемого из чая напитка [10]. Каллусные культуры, инициированные из однолетних побегов *C. Sinensis*, сохраняют способность к образованию характерных для исходных эксплантов ФС, в том числе флаванов [11]. При этом знания об их составе и степени полимеризации крайне малы.

Целью настоящей работы стало изучение содержания и состава редокс-активных соединений фенольной природы с различной молекулярной массой (катехинов и проантоцианидинов) в каллусной культуре чайного растения.

Каллусные культуры чайного растения (*Camellia sinensis* L.) выращивали на модифицированной питательной среде Хеллера в темноте или при 16-час. фотопериоде в условиях факторостата ИФР РАН. При изучении действия тяжелых металлов к основной питательной среде добавляли $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ концентрация 2×10^{-5} М. Состав и содержание флаванов анализировали методом ВЭЖХ и масс-спектрометрии, используя 70%-ные ацетоновые экстракты лиофильно-высушенного материала [12]. Необработанные данные MS были преобразованы в формат NetCDF и обработаны с программой MetAlign [13].

Изучение фенольного комплекса каллусных культур чая показало, что флаваны были представлены 13 соединениями, включая как мономерные, так и олигомерными (проантоцианидины) метаболиты. На их долю приходилось почти 70% от всего фенольного комплекса каллусов чайного растения. При этом состав этих компонентов был одинаков, то есть не зависел от возраста культур и условий их роста (свет или темнота).

Мономерные флаваны были представлены (+)-катехином и (-)-эпикатехином. Преобладающим соединением был (-)-эпикатехин, его относительное накопление в 3-5 раз превышало таковое (+)-катехина. Кроме того, был идентифицирован гексозид (-)-эпикатехина, который впервые был обнаружен в каллусной культуре чайного растения.

Олигомерные флаваны были представлены проантоцианидинами типа Б с различной степенью полимеризации, согласно значениям m/z ионов [МН]. Это были два изомера димерной структуры, три изомера - тримерной структуры, три изомера тетрамерной структуры и два изомера – пентамерной структуры. Их относительное содержание уменьшалось в ряду $\text{ПА}2 > \text{ПА}3 > \text{ПА}4 > \text{ПА}5$. Это свидетельствует о преимущественном образовании в каллусах чая димерных форм. Таким образом, чем выше степень полимеризации флаванов, тем ниже их содержание в *in vitro* культуре, как это отмечалось и другими авторами [14]. При этом у каллусов, выращиваемых на свету накопление проантоцианидинов в среднем на 30 – 40% превышало таковое при их выращивании в темноте (за исключением пентамеров).

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что состав ФС каллусных культур чая менее разнообразен, по сравнению с таковым интактного растения, за исключением образования проантоцианидинов с более «широким» спектром полимеризации. Эти изменения в определенной степени свидетельствуют о запасании энергетического материала в виде олигомеров фенольной природы, которые могут быть использованы в качестве дополнительных источников углерода для поддержания жизнедеятельности растительных клеток, что особенно важно при стрессовых воз-

действиях. Это согласуется с нашими данными по накоплению редокс-метаболитов флавановой природы, в частности (+)-катехина, а также димеров и тетраметов проантоцианидинов типа Б при относительной стабильности уровня ПОЛ в каллусной культуре чайного растения, подвергнутой действия тяжелых металлов (в частности Cd), что подтверждает их редокс-активную роль в клетках растений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-24-00359.

Библиографические ссылки

1. Meitha, K.; Pramesti, Y.; Suhandono, S. Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits. *Int. J. Food Sci.* 2020, 8817778. <https://doi.org/10.1155/2020/8817778>
2. Ali, S.; Tyagi, A.; Bae, H. ROS interplay between plant growth and stress biology: Challenges and future perspectives. *Plant Physiol. Biochem.* 2023, 203, 108032. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108032>
3. Singh, A.K.; Dhanapal, S.; Yadav, B.S. The dynamic responses of plant physiology and metabolism during environmental stress progression. *Mol. Biol. Rep.* 2020, 47, 1459–1470. <https://doi.org/10.1007/s11033-019-05198-4>
4. Dai, J.; Mumper, R.J. Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules* 2010, 15, 7313–7352. <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>
5. Cosme, P.; Rodriguez, A. B.; Espino, J.; Garrido, M. Plant phenolics: Bioavailability as a key determinant of their potential health-promoting applications. *Antioxidants* 2020, 9, 1263. <https://doi.org/10.3390/antiox9121263>
6. Chandran, H.; Meena, M.; Barupal, T.; Sharma, K. Plant tissue culture as a perpetual source for production of industrially important bioactive compounds. *Biotechnol. Rep.* 2020, 26, e00450. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00450>
7. Efferth, T. Biotechnology applications of plant callus cultures. *Engineering.* 2019, 5, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.006>
8. Wu, T.; Kerbler, S.M.; Fernie, A.R.; Zhang, Y. Plant cell cultures as heterologous bio-factories for secondary metabolite production. *Plant Comm.* 2021, 2, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2021.100235>
9. Meng, X.H.; Li, N.; Zhu, H.T.; Wang, D.; Yang, C.R.; Zhang, Y.J. Plant resources, chemical constituents, and bioactivities of tea plants from the genus *Camellia* Section Thea. *J. Agric. Food Chem.* 2018, 67, 5318–5349. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05037>
10. Samanta, S. Potential bioactive components and health promotional benefits of tea (*Camellia sinensis*). *J. Am. Nutr. Assoc.* 2022, 41, 65-93. <https://doi.org/10.1080/07315724.2020.1827082>
11. Goncharuk, E.A.; Zubova, M.Y.; Nechaeva, T.L.; Kazantseva, V.V.; Gulevich, A.A.; Baranova, E.N.; Lapshin, P.V.; Katanskaya, V.M.; Aksenova, M.A.; Zagorskina, N.V. Effects of Hydrogen Peroxide on In Vitro Cultures of Tea (*Camellia sinensis* L.) Grown in the Dark and in the Light: Morphology, Content of Malondialdehyde, and Accumulation of Various Polyphenols. *Molecules* 2022, 27, 6674. <https://doi.org/10.3390/molecules27196674>

12. Karonen, M.; Loponen, J.; Ossipov, V.; Pihlaja, K. Analysis of procyanidins in pine bark with reversed-phase and normal-phase high-performance liquid chromatography–electrospray ionization mass spectrometry. *Anal. Chim. Acta.* 2004, 522 (1), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.06.041>

13. De Vos, R.C.; Moco, S.; Lommen, A.; Keurentjes, J.J.; Bino, R.J.; Hall, R.D. Untargeted large-scale plant metabolomics using liquid chromatography coupled to mass spectrometry. *Nat. Protoc.* 2007, 2 (4), 778–791. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.95>

14. Fraser, K.; Harrison, S.J.; Lane, G.A.; Otter, D.E.; Hemar, Y.; Quek, S.Y.; Rasmussen, S. HPLC–MS/MS profiling of proanthocyanidins in teas: A comparative study. *J. Food Composition and Analysis.* 2012, 26(1-2), 43-51. <http://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.01.004>

Влияние погодных условий сбора урожая сои на антиоксидантную систему её семян

**Иваченко Л. Е.^{А,Б*}, Лаврентьева С. И.^{А,Б}, Блинова А. А.^{А,Б},
Бондаренко О. Н.^Б**

^А Благовещенский государственный педагогический университет, кафедра химии,
Благовещенск, Россия, *E-mail: ivachenko-rog@yandex.ru

^Б Всероссийский научно-исследовательский институт сои, лаборатория биотехнологии,
Благовещенск, Россия.

Соя является востребованной белково-масличной культурой во всем мире. Основным регионом возделывания сои в России является Дальний Восток. Климат Амурской области резко-континентальный по температурным признакам с элементами муссонности по осадкам. Он характеризуется большим количеством солнечных дней, коротким безморозным периодом, значительными колебаниями по количеству осадков и температуре, что позволяет успешно возделывать теплолюбивую культуру сою. Главной задачей селекционеров является создание сортов сои с повышенной урожайностью и высокой приспособленностью к неблагоприятным условиям окружающей среды [1]. Установлено, что в зависимости от генотипа и условий окружающей среды в семенах сои значительно варьирует содержание и качество белка [2]. В. Т. Синеговской и соавторами выявлена тесная корреляционная взаимозависимость содержания белка в семенах сои с количеством выпавших осадков и гидротермальным коэффициентом в период образования бобов – налива семян [3]. Неблагоприятные условия выращивания индуцируют высокие концентрации активных форм кислорода (АФК), которые могут повредить внутриклеточные макромолекулы. Примерно 1% потребляемого растениями O₂ направляется на образование АФК, которые представляют собой свободные радикалы, образующиеся во время метаболизма кислорода (гидроксильный радикал