

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ THE PHYSIOLOGICAL ROLE OF PHENOLIC COMPOUNDS

Н.М. Пояркова, к.б.н., доцент кафедры растениеводства и селекции

С.Е Сапарклычева, к. с.-х. н., доцент кафедры растениеводства и селекции

Уральский государственный аграрный университет

Рецензент: А. С. Гусев к. б. н., доцент Ур ГАУ

Аннотация

Обзорная статья посвящена физиологическим функциям фенольных соединений, которые являются обширным классом веществ вторичного метаболизма растений. Многие функции фенольных соединений в растениях хорошо известны: их участие в процессах фотосинтеза, дыхания, роста, в формировании защитных механизмов при адаптации. Изучается внутриклеточная локализация биосинтеза фенольных соединений и их накопления. Важным фактором регуляции этих процессов является свет. Современные методы и оборудование выявляют новые свойства этих соединений и связанные с ними функции, в том числе широко исследуется антиоксидантная активность фенольных соединений. Фенолы обладают выраженным фармакологическим действием. Большое количество фенольных соединений содержится в эфирных маслах у дикорастущих и культивируемых лекарственных и пищевых растений. Изучается качественный состав эфирных масел, биоморфологические особенности и продуктивность эфиромасличных растений. Выясняется вклад фенольных соединений в формирование устойчивости растений к стрессовым условиям и в реакцию растений на антропогенные воздействия. Изучается роль фенольных соединений в механизме аллелопатических отношений между растениями разных видов.

Ключевые слова: фенольные соединения, флавоноиды, биосинтез фенольных соединений, антиоксидантная активность, адаптация, аллелопатические отношения, эфиромасличные растения.

Annotation

The review article is devoted to the physiological functions of phenolic compounds, which are an extensive class of substances of the secondary metabolism of plants. Many functions of phenolic compounds in plants are well known: their participation in the processes of photosynthesis, respiration, growth, in the formation of protective mechanisms during adaptation. Intracellular localization of phenolic compounds biosynthesis and their accumulation is studied. An important factor in the regulation of these processes is light. Modern methods and equipment reveal new properties of these compounds and related functions, including the antioxidant activity of phenolic compounds. Phenols have a pronounced pharmacological effect. A large number of phenolic compounds found in essential oils in wild and cultivated medicinal and food plants. The qualitative composition of essential oils, biomorphological features and productivity of essential oil plants are studied. The contribution of phenolic compounds to the formation of plant resistance to stress conditions and to the reaction of plants to anthropogenic influences is revealed. The role of phenolic compounds in the mechanism of allelopathic relations between plants of different species is studied.

Key words: phenolic compounds, flavonoids, biosynthesis of phenolic compounds, antioxidant activity, adaptation, allelopathic relations, essential oil plants.

В последние годы многие исследования в области физиологии и биохимии растений связаны с разнообразием и биологическим действием фенольных соединений — веществ вторичного метаболизма, образующихся в растениях. Такие исследования очень важны для целенаправленного использования большого круга дикорастущих и интродуцированных растений, накапливающих ряд вторичных соединений, в разных отраслях медицины, в сельском хозяйстве, в создании городских ландшафтов и др. [2,3,25,27,28]. Фенольные соединения играют важную роль в различных физиологических процессах у растений: фотосинтезе, дыхании, росте, адаптации.

Фенольными соединениями называются вещества, содержащие ароматические кольца с гидроксильной группой, а также их различные производные. Выявлено более восьми тысяч фенольных соединений, такое разнообразие связано с различными типами углеродного скелета

молекул и замещениями в бензольных кольцах в разных положениях. Изучение этих соединений проводится уже давно, и еще четверть века назад были подведены итоги в изучении распространения, метаболизма и функции фенольных соединений в растениях [14]. В настоящее время фенольные соединения широко изучаются в различных направлениях, выявляются новые свойства этих соединений и связанные с ними функции, а также возможность использования фенольных соединений в неизвестных ранее аспектах [30].

Основными местами синтеза фенольных соединений являются пластиды, митохондрии, эндоплазматический ретикулум, местами их внутриклеточной локализации – вакуоли, клеточная стенка [17,29]. Установлено, что значительная доля усвоенного при фотосинтезе углерода используется на образование ароматических аминокислот и их производных. Такие ароматические аминокислоты как фенилаланин, триптофан и тирозин не только важны для синтеза белка, но и служат предшественниками тысяч специфических соединений, влияющих на рост растений, их развитие, размножение и адаптацию. Изучены пути биосинтеза фенилаланина в пластидах [32], фенилаланин является развилкой метаболизма на биосинтезы белка и фенольных соединений.

Известны два пути биосинтеза фенольных соединений: шикиматный и ацетатно-малонатный [14]. Было установлено, что шикимовая кислота – ключевой промежуточный продукт в биосинтезе ароматических аминокислот и фенольных соединений у растений. Исходными соединениями для ее образования служат фосфоенолпировиноградная кислота (образующаяся при гликолитическом распаде сахаров) и эритрозо-4-фосфат (продукт превращения углеводов в пентозофосфатном цикле). Шикиматный путь имеется в растениях, грибах и микроорганизмах и отсутствует у животных. По этой причине ароматические аминокислоты в организмах животных не синтезируются и являются для них незаменимыми аминокислотами.

Важным фактором регуляции биосинтеза и накопления фенольных соединений является свет. Влияние света осуществляется через процесс фотосинтеза: через образование предшественника фенольных соединений – эритрозо-4-фосфата, через образование аденозинтрифосфата и восстановленного трифосфопиридиннуклеотида. Свет необходим также для формирования хлоропластов, в которых не только происходит процесс фотосинтеза, но синтезируются фенольные соединения. Кроме того, действие света происходит через регуляторные механизмы с участием фоторецепторов красного света фитохромов и синего света криптохромов [12].

Выделяют несколько классов фенольных соединений, один из самых больших классов представляют флавоноиды, основу которых составляет скелет, имеющий два ароматических кольца, связанных тремя углеродными атомами. Образование флавоноидных соединений является особенностью высших растений и не свойственно грибам, лишайникам и микроорганизмам. флавоноиды неравномерно распределяются в растениях – в основном содержатся в листьях, цветках, плодах, меньше в стеблях и подземных органах. В клетках флавоноиды накапливаются в вакуолях в виде гликозидов. Свободные флавоноиды находятся в специальных образованиях: смоляные и эфиромасляные ходы, каналы, железки и т.д. В надземных частях растений 85% флавоноидов локализовано в клетках эпидермы и только 15% в остальных тканях.

Наиболее восстановленной группой флавоноидов являются катехины, которые содержатся во многих плодах и ягодах, но особенно богаты ими молодые побеги чайного куста, содержащие до 30% катехинов на сухую массу. Катехинам свойственно Р-витаминное действие на кровеносные сосуды – они увеличивают упругость кровеносных капилляров и нормализуют их нарушенную проницаемость. Экспериментально доказано, что флавоноиды чая обладают антиоксидантным, антиканцерогенным и антимуtagenным действием, имеют антисклеротический и противовоспалительный эффекты. Исследован уровень накопления катехинов в зеленом и черном чае в разных агроэкологических условиях [19].

К флавоноидам относятся также антоцианы, являющиеся непластидными водорастворимыми пигментами, окрашивающими плоды, листья, лепестки в разнообразные оттенки от розового до

фиолетово-черного. Антоцианы содержатся в виде гликозидов в вакуолях. Подтверждено, что антоцианы являются стрессовыми метаболитами, биосинтез которых активируется во время действия на растения неблагоприятных факторов среды, что антоцианы могут служить маркерами уровня адаптации растений к стрессовым условиям [11].

Особенно широко изучается антиоксидантное действие фенольных соединений на растительные и животные организмы [13,21,22]. В клетках растений под влиянием стрессовых воздействий увеличивается количество высокореактивных форм кислорода, вызывающих изменения в метаболизме, патологические процессы, некротические повреждения вегетативных и генеративных органов и даже гибель растений. В растениях выработана система антиоксидантной защиты, в которую входят фенольные соединения. Изучается возможность повышения устойчивости растений обработкой их различными полифенолами. Например, отмечено уменьшение степени поражения бурой ржавчиной молодых растений ржи [10] при обработке их флавоноидными гликозидами. Обработка салициловой кислотой усиливает антиоксидантную систему в листьях пшеницы и повышает ее устойчивость к холоду [16]. Использование фенольных соединений для обработки растений или семян некоторых овощных культур показало повышение полевой всхожести семян, повышение урожайности плодов и корнеплодов и снижение накопления тяжелых металлов в листовой зелени, на основании чего сделан вывод о повышении адаптивных свойств овощных культур [7].

К фармакологически активным растительным веществам относятся фенолы и хиноны, гликозиды, принадлежащие к флавонам, флавононам, антоцианам, а также эфирные масла, содержащие фенолы и фенольные эфиры. Повышенное внимание уделяется растениям – источникам фенольных соединений с очень сильным биологическим действием, относящимся к семейству Яснотковые (*Lamiaceae*), таким как душица (*Origanum vulgare L.*), тимьян (*Thymus serpyllum L.*), агастахе (*Agastache*), лофант (*Lophanthus Adans.*) [1,4,26]. Изучается продуктивность, биоморфологические особенности, изменчивость образцов и сортов, интродуцированных в различные климатические зоны [5,23,24,31]. Сильным бактерицидным, инсектицидным и фунгицидным действием обладают фенолы карвакрол и тимол, содержащиеся в эфирных маслах этих растений, но действие карвакрола во много раз сильнее [20,31]. Немало исследований посвящено поиску морфологических признаков, коррелирующих с повышенным содержанием указанных веществ, например высота растений, окраска и форма соцветий, так как наиболее высокое их содержание наступает в фазе цветения. Поскольку источником фенольных соединений у многих эфиромасличных растений является вся надземная масса, предлагается (на примере рода *Origanum*) выявлять наиболее продуктивные образцы по количеству эфирных железок на одном квадратном миллиметре листа и по диаметру железок [23]. Изучали антиоксидантное действие эфирных масел, извлеченных из растений семейства *Lamiaceae* в тестах *in vivo* и *in vitro* [21]. Эфирное масло орегано, содержавшее 67,5% карвакрола, увеличивало продолжительность жизни здоровых мышей, снижало содержание продуктов перекисного окисления в крови, печени и мозге, сохраняло уровень важнейших полиненасыщенных жирных кислот в ткани мозга у старых мышей.

Изучается состав, локализация и количество фенольных соединений у разных видов растений в нескольких аспектах: при разных способах культивирования, в том числе в каллусной культуре [15,17,33], на протяжении онтогенеза [6], в разных органах растения [23]. Разработка методов культивирования тканей в условиях *in vitro* позволяет использовать их не только как объект изучения, но и как перспективный источник получения фармакологически ценного сырья.

Накопление фенольных соединений в окружающей среде из сточных вод с промышленных предприятий требует изучения их действия на водные растения. Преобладающие в сточных водах резорцин, пирокатехин и гидрохинон поглощаются водными растениями и ингибируют рост листьев, снижают содержание хлорофилла [8]. Еще одним интересным направлением изучения фенольных соединений является исследование аллелопатических отношений между разными

видами растений через воздействие веществами фенольной природы [9,18], которые накапливаются в почве при разложении растительных остатков. Установленное с помощью биотестов аллелопатическое воздействие на прорастание семян и рост проростков культурных и дикорастущих видов объясняется их эффектом на многие биохимические реакции и физиологические процессы. Фенольные аллелохимические вещества могут повышать проницаемость клеточной мембраны, приводя к потере клетками содержимого и повышению уровня перекисного окисления липидов. В связи с этим рост клеток замедляется, происходит гибель растительной ткани, в связи с чем подавляется прорастание семян и развитие проростков.

Таким образом, интерес к многообразному миру фенольных соединений у специалистов разных отраслей науки и практики позволяет предполагать появление новых технологий использования этих многофункциональных веществ, создаваемых растениями, в разных отраслях сельского хозяйства, медицины, в создании благоприятных городских ландшафтов.

Библиографический список

1. Абрамчук А.В. Биоморфологические особенности видов *Agastache Clayte* x *Gronou* в условиях Среднего Урала / А. В. Абрамчук, М. Ю. Карпухин. Аграрный вестник Урала. 2016. №11 - С.4-7.
2. Абрамчук А.В. Дикорастущие травянистые растения /А. В. Абрамчук., В.Р.Лаптев. - Екатеринбург. 2012 - 72с.
3. Абрамчук А.В. Особенности роста и развития эфирномасличных растений в условиях Среднего Урала /А. В. Абрамчук, Сб. стратегические задачи аграрного образования и науки. Матер межд. Н.-пр. кон. УрГАУ. 2015. - С. 8-11
4. Абрамчук А.В. Сравнительная оценка продуктивности видов и сортов лопанта (*Lophanthus Adans.*) в условиях интродукции / А. В. Абрамчук, М. Ю. Карпухин. Аграрный вестник Урала. 2016. № 12 (154) - С..4-7.
5. Абрамчук А.В. Рост и развитие *Agastacherugosa* O. Kuntze под влиянием возрастающих доз азотных удобрений/ А.В. Абрамчук, М. Ю. Карпухин. Аграрный вестник Урала. 2017. №4 С.1-3.
6. Алмуграби Е. Динамика содержания фенольных соединений в онтогенезе *Brassica oleracea* / Е. Алмуграби, М.И. Калимуллин, О.А. Тимофеева Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С. 17-20
7. Балашова И.Т. Использование фенольных соединений класса стероидных гликозидов для повышения адаптивных свойств овощных культур / И.Т.Балашова, Е.Г. Козарь, Н.Е. Машенко. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С. 28-35
8. Борисова Г.Г. Влияние резорцина, пирокатехина и гидрохинона на морфофизиологические характеристики *Salvinia natans*/ Г.Г. Борисова, М.Г. Малева, С.А. Сырчин. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU, 2018. С. 56-60
9. Будкевич Т.А. О протекторной роли фенольных соединений в ризосфере многолетних луговых трав при внедрении в посевы инвазивного вида золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.)/Т.А. Будкевич, В.Н. Прохоров. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С. 64-68
10. Волынец А.П. Фенольные соединения в жизнедеятельности растений/ А.П.Волынец. Минск: Беларуская навука, 2013.- 283с.
11. Гончаровская И.В. Содержание антоцианов и халконов в побегах крупноплодных сортов и кребов яблони в связи с зимостойкостью./И.В. Гончаровская, В.Ф. Левон, С.В. Клименко. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.106-110

12. Загоскина Н.В. Влияние дефицита фитохромов А и В на накопление антоцианов у растений *Arabidopsis thaliana*, выращенных на красном и белом свете / Н.В.Загоскина, Т.Н.Николаева, Г.Н. Ширшикова. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.154-159
13. Загоскина Н.В. Фенольные соединения и их участие в защите растений от стрессовых воздействий / Н.В.Загоскина. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.150-153
14. Запрометов М.Н. Фенольные соединения. Распространение, метаболизм и функции в растениях./ М. Н. Запрометов. М.: Наука, 1993.- 272 с.
15. Зубова М.Ю. Флавоноиды в *in vitro* культурах *Camellia sinensis* / М.Ю.Зубова, В.И.Осипов, Н.В.Загоскина. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU,2018,С. 162-165
16. Игнатенко А.А. Участие салициловой кислоты в регуляции активности антиоксидантной системы при холодной адаптации пшеницы/ А.А.Игнатенко, Н.С. Репкина, В.В. Таланова. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.166-170
17. Катанская В.М. Локализация фенольных соединений в каллусных культурах рододендронов. / В.М.Катанская, Н.В.Загоскина. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.178-181
18. Кондратьев М.Н. Фенолы в аллелопатических отношениях между растительными видами / М.Н.Кондратьев, Ю.С. Ларикова. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С. 199-204
19. Малюкова Л.С. Состав и содержание флавоноидов в готовом чае, выращенном в условиях Черноморского побережья Краснодарского края./ Л.С. Малюкова, Т.Г. Цюпко, З.В. Притула. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.272-277
20. Масленникова Д.Р. Особенности накопления карвакрола в растениях *Origanum vulgare* L./ Д.Р.Масленникова, Ф.М.Шакирова Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С. 282-286
21. Мишарина Т.А. Природные биоантиоксиданты. Антирадикальные свойства эфирных масел орегано, тимьяна и чабера /Т.А. Мишарина, Е.С. Алинкина. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. №2(3). С.174-176
22. Мяделец М. А. Биологически активные вещества и антиоксидантная активность растений рода *Agastache Claytone* x *Gronov.* (Lamiaceae L.), культивируемых в условиях Среднего Урала / М. А. Мяделец, Т. А. Кукушкина, Т. А. Воробьева, Т. М. Шалдаева / Химия растительного сырья. 2014. - № 4. - С. 147-152.
23. Найда Н.М. Исследование биоморфологических и онтогенетических особенностей двух видов семейства Яснотковых (Lamiaceae)/ М.Н. Найда, Н.Ф. Лукиных. "Изв. С.-петерб. аграр. Унта". Сельское и лесное хозяйство. 2015
24. Орел Т.И. Изучение интродуцированных растений рода *Origanum* в Никитском ботаническом саду /Т.И.Орел, Л.А. Хлыпенко, В.Д. Работягов. Бюллетень Никитского ботанического сада. 2012. вып.104. с.76
25. Пояркова Н.М. Особенности применения Агастахе (*Agastache*) в садово-парковом строительстве /Н.М.Пояркова. Вестник биотехнологии. 2018. №1.(электрон. журнал)
26. Сапарклычева С. Е. Виды лобанга, интродуцируемые на Среднем Урале/ С. Е. Сапарклычева. Екатеринбург: Вестник биотехнологии. 2018. №3 (электрон. журнал)

27. Сапарклычева С.Е. Виды тимьяна (*Thymus serpyllum* L.), произрастающие на ландшафтах Урала/ С. Е. Сапарклычева, Н. М. Пояркова. Екатеринбург. Вестник биотехнологии. 2018. №3 (электрон. журнал)
28. Сапарклычева С.Е. Ассортимент растений для создания ароматических садов /С. Е. Сапарклычева. Вестник биотехнологии. 2018. №1. (электрон. журнал)
29. Федуреаев П.В. Субклеточная компартментация полифенолов высших растений. / П.В. Федуреаев, Л.Н. Скрыпник, Г.Н. Чупахина. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С.374-378
30. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. Сб. научных статей по материалам X междунар. Симпозиума "Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты". М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018
31. Хазиева Ф.М. Исследование внутривидовой изменчивости эфирного масла душицы обыкновенной (*Origanum vulgare*) / Ф.М. Хазиева, В.И. Осипов, И.Н. Коротких. Химия растительного сырья. 2016. №4. С. 97-105
32. Dudareva N. Phenylalanine biosynthetic network: what's left to know? / N Dudareva. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018.-С.3-4
33. Locatelli F. Flax cell cultures for the production of bioactive compounds/ F Locatelli .Mascheretti I., Cusano E. Фенольные соединения: функциональная роль в растениях. М.: Изд. PRESS-BOOK.RU. 2018. С. 4-7