



УДК 581.19

DOI: 10.25688/2076-9091.2022.48.4.1

Юлия Геннадьевна Кропова¹
Анастасия Дмитриевна Самарина²

^{1,2} Московский городской педагогический университет,
Москва, Россия

¹ kropovayug@mgpu.ru

² sudarenkovaad768@mgpu.ru

ПРОТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА БЕТАЛАИНОВЫХ ПИГМЕНТОВ РАСТЕНИЙ

Аннотация. Несмотря на использование беталаиновых пигментов в пищевой промышленности, молекулярные механизмы их действия и их метаболизм требуют изучения. Есть данные, свидетельствующие о протекторных и антиоксидантных свойствах пигментов. Следует отметить, что значительная часть работ посвящена изучению бетанина свеклы, тогда как свойства амарантина и бетаксантинов недостаточно исследованы, поэтому изучение свойств пигмента как компонента антиоксидантной системы растений является актуальным. В статье представлены результаты изучения динамики изменения активности ферментов-антиоксидантов при развитии растений, проведен сравнительный анализ изменения активности ферментов, обладающих антиоксидантной активностью и содержанием беталаиновых пигментов, являющихся антиоксидантами.

Ключевые слова: беталаины, бетацианины, амарантин, протекторные свойства, шикиматный путь биосинтеза, антиоксидантная активность, оксидоредуктазы, пероксидаза, супероксиддисмутаза

UDC 581.19

DOI: 10.25688/2076-9091.2022.48.4.1

Julia Gennadievna Kropova¹
Anastasiya Dmitrievna Samarina²

^{1,2} Moscow City University,
Moscow, Russia

¹ kropovayug@mgpu.ru

² sudarenkovaad768@mgpu.ru

PROTECTOR PROPERTIES OF PLANT BETALAIN PIGMENTS

Abstract. Despite the use of betalaine pigments in the food industry, the molecular mechanisms of their action and their metabolism need to be studied. There is evidence of protector and antioxidant properties of pigments. It should be noted that a significant part of the work is devoted to the study of betanine beets, while the properties of amarantine and betaxanthins have not been sufficiently investigated, so the study of the properties of the pigment as a component of the antioxidant system of plants is relevant. The article presents the results of studying the dynamics of the change in the activity of antioxidant enzymes during the development of plants, comparative analysis of changes in activity of enzymes possessing antioxidant activity and content of betalaine pigments being antioxidants was carried out.

Keywords: betalaines, betacyanins, amarantine, protector properties, shikimate biosynthesis pathway, antioxidant activity, oxidoreductases, peroxidase, superoxide dismutase

Введение

Пигменты растений с древних времен вызывали у людей интерес, в первую очередь с точки зрения использования их в качестве красителей. Существуют зеленые и желтые, красные и фиолетовые пигменты.

Каждый знает о таких пигментах, как хлорофиллы. Две разновидности хлорофилла представлены порфириновым кольцом и различаются только боковыми радикалами. Являясь активными фоторецепторами, хлорофиллы участвуют в фотосинтезе. Каротиноиды, желтые пигменты, хорошо известны благодаря корнеплодам моркови, плодам цитрусовых растений.

Несколько разновидностей антоцианов окрашивают лепестки цветов в голубой, розовый, синий, фиолетовый и красный цвета, также некоторые формы антоцианов содержатся в побегах капусты краснокочанной и винограда.

Учеными было установлено, что кроме хлорофиллов, каротиноидов и антоцианов есть еще ряд пигментов, механизм синтеза которых и их биологическая

роль активно изучаются в настоящее время. Помимо каротиноидов, желтую окраску растениям придают халконы, ауроны. Эти пигменты не так распространены, как каротиноиды, их можно обнаружить в соцветиях львиного зева, кислицы. За счет своей химической структуры халконы стимулируют в растительных клетках синтез флавоноидов и флавонов. Желтый пигмент антохлор был обнаружен в растениях первоцвета, примулах. Антофеин, темный пигмент, придает венчикам цветов крапчатость. Фитохром также придает растениям голубую окраску.

В настоящее время много работ посвящено изучению свойств беталаиновых пигментов. Эти водорастворимые пигменты в большом количестве содержатся в таких растениях, как свекла, целозия, амарант, бугенвиллия и в некоторых видах кактусов. Благодаря хорошей растворимости в воде эти пигменты активно используются в пищевой промышленности в качестве красителей, ранее эти вещества использовали для окрашивания тканей.

Свое название «беталаины» пигменты получили от латинского названия свеклы столовой, растения, из которого они были выделены впервые.

Различают две группы беталаиновых пигментов: **бетацианины** и **бетаксантины**.

Бетаксантины — это пигменты, которые обуславливают желто-оранжевую окраску растений. К этой группе относят вьюгаксантин, портулаксантин, индиксантин.

На рисунке 1 представлена структура индиксантина.

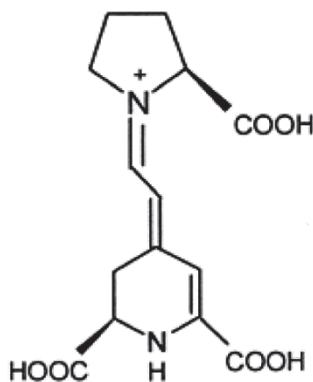


Рис. 1. Структура индиксантина

Бетацианины придают растениям красно-фиолетовую окраску. Это бетанин, амарантин, изобетанин.

Конечно, бетацианины в большей степени применяются в пищевой промышленности, однако следует отметить растения рода мангольд, которые содержат как бетацианины, так и бетаксантины, но в разных частях растения.

Пигмент «бетанин» представляет собой бетанидин-5-β-D-глюкопиранозид, углеводная часть молекулы представлена глюкозой, а бетанидин является агликоном.

Промышленное название этого пигмента — свекольный красный (Е-162). Следует отметить, что бетанин обладает антиоксидантными свойствами и защищает липопротеины низкой плотности от окисления. Благодаря такой физиологической активности пигмент получил широкое распространение [2].

На рисунке 2 представлена структура бетанина.

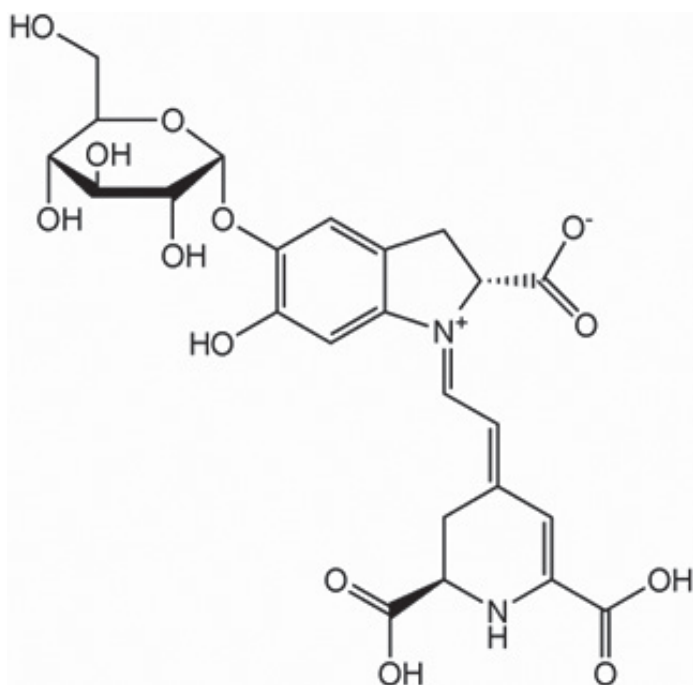


Рис. 2. Структура бетанина

Второй бетацианин, на котором мы хотели бы остановиться, это пигмент амарантин, полученный из растений рода амарант. Растения рода амарант являются интродуцентами, и если декоративные сорта активно используются для озеленения, то овощные и зерновые сорта только набирают популярность. Следует отметить, что это растение активно используется в пищу за счет высокого содержания белков и биологически активных соединений.

Амарантин является 5-О-глюкоронидо-гликозид бетанидином, углеводной частью пигмента является глюкоза и глюкуроновая кислота.

На рисунке 3 представлена структура амарантина.

Следует отметить также, что натуральный пигмент амарантин применяется в пищевой промышленности. Однако существует искусственный пигмент под названием «Амарант Е-123», имеющий сходный цвет, однако совершенно иную химическую природу. Более того, этот пигмент запрещен к использованию в ряде стран, в том числе и в России.

На рисунке 4 представлена структура амаранта Е-123.

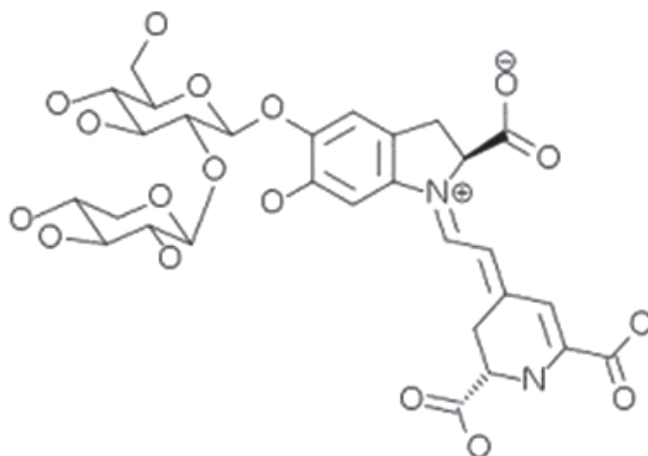


Рис. 3. Структура амарантина

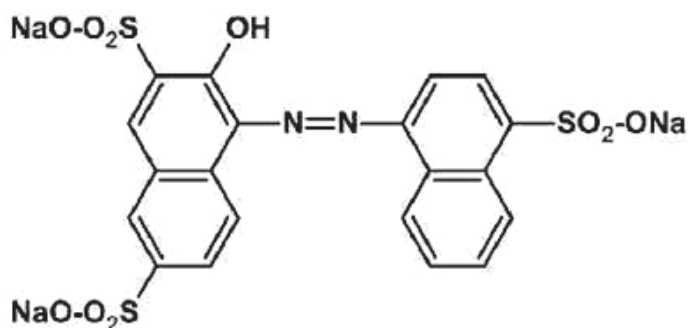


Рис. 4. Структура амаранта E-123

Интересным является процесс биосинтеза и накопления беталаиновых пигментов. Если в растениях свеклы бетанин накапливается в корнеплодах и, соответственно, синтезируется по мере взросления растения, то активность биосинтеза амарантина зависит от сорта амаранта. Так, есть краснелистные сорта (например, сорт Валентина), у которых пигмент начинает синтезироваться при прорастании семян и продолжается в течение всей жизни растения, амарантин содержится во всех частях побега (стебель, листья, соцветия). Однако пестролистный сорта различаются по интенсивности пигмента и его локализации. Так, пигмент может активно синтезироваться при вегетации и активном росте, но при цветении не происходит синтеза. Накопление пигмента может происходить и в стеблях, причем исключительно в нижней части [6].

Изучение свойств беталаиновых пигментов показало, что их устойчивость в растворе зависит от значений кислотности среды. Так, подкисление раствора приводит к разрушению структуры молекулы как амарантина, так и беталаина и раствор пигментов приобретает желтую окраску. Это важное свойство

беталаиновых пигментов необходимо учитывать при их хранении и практическом использовании в качестве красителей.

Также отмечено изменение структуры молекул пигментов при действии высоких температур, однако сравнение пигментов амарантина и бетанина позволяет говорить о более высокой устойчивости амарантина к действию стрессоров.

Наиболее вероятным путем разрушения структуры молекул можно считать повышение активности фермента беталаинооксидазы. Изначально этот фермент был выделен из корнеплодов свеклы столовой. Позднее выделили фермент из растений амаранта, способный обесцвечивать как амарантин, так и бетанин. Окисление пигментов происходит и в присутствии других окислительных ферментов — пероксидазы и дифенолоксидазы.

Биологическое значение этих пигментов еще не полностью изучено, однако есть немало исследований, доказывающих роль этих пигментов в антиоксидантной системе организма [5]. Наряду с пигментами, антиоксидантной активностью обладают и ферменты-оксидоредуктазы. Например, супероксиддисмутаза защищает растения от действия активных окислителей, при действии на организм стрессорных факторов активность этого фермента существенно возрастает. Фермент пероксидаза также является маркером развития стрессовых реакций в организме. При инфицировании, при действии низких температур, при действии ультрафиолета активность этого фермента резко возрастает, поэтому изучение активности и полиморфизма фермента является диагностическим показателем устойчивости растений. Следует отметить, что пероксидаза проявляет оксидазную активность, окисляя гормон роста растений индолилуксусную кислоту (ИУК). При этом ИУК, так же как и амарантин, синтезируются из одного предшественника — шикимовой кислоты, то есть эти вещества являются конкурентами. Таким образом, изучение активности пероксидазы, супероксиддисмутазы, а также исследование количества беталаиновых пигментов позволит определить уровень устойчивости растений к стрессу. Также изучение протекторных свойств беталаиновых пигментов приведет к расширению спектра их использования.

Материалы и методы исследования

Содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом, используя экстракты растительного материала в этаноле при значениях длины волны 649, 665 и 470 нм. Высечки листа амаранта изучаемых сортов помещали в 98-процентный этанол (десятикратный объем) и оставляли экстрагировать на 24 часа в темноте. Затем проводили измерения на спектрофотометре.

Содержание пигментов определяли по формулам:

$$C_a = 1395 \cdot A_{665} - 6,88 \cdot A_{649},$$

$$C_b = 24,96 \cdot A_{649} - 7,32 \cdot A_{665},$$

$$C_k = (1000 \cdot A_{470} - 2,05 \cdot A_{665} - 114,8 \cdot A_{649}) / 245,$$

где C_a — содержание хлорофилла a (мкг/г ткани),

C_b — содержание хлорофилла b (мкг/г ткани),

C_k — содержание хлорофилла каротина k (мкг/г ткани).

Содержание амарантина определяли в водных вытяжках растительного материала спектрофотометрически при длине волны 537 нм, далее рассчитывали по формуле:

$$C = A \cdot V \cdot M / E \cdot P,$$

где A — поглощение,

V — объем пробы (мл),

M — молекулярная масса (728),

E — коэффициент молярной экстинкции ($5,66 \cdot 10^4 M \cdot \text{см}$),

P — масса растительного материала (г).

Для изучения свойств беталаиновых пигментов мы проводили экстрагирование амарантина по следующей методике. Свежесобранный материал (мы использовали листья, хотя пигмент можно выделять и из других частей растения) гомогенизировали в пятикратном объеме трис-буфера (концентрация 0,05 M) с добавлением лимонной кислоты (1 %). Затем экстракт центрифугировали. Для дальнейшей очистки использовали супернатант. Очистку пигмента можно проводить разными методами: хроматографией, гельфильтрацией, диализом. Мы применяли гельфильтрацию с использованием сефадекса в качестве носителя ($3 \cdot 70$). Фракционирование супернатанта давало в результате 4 фракции: высокомолекулярные соединения (полипептиды и полисахариды); фракция высокомолекулярных соединений с примесью беталаиновых пигментов в следовых концентрациях; фракция амарантина красно-фиолетового цвета); фракция желтых пигментов [1].

Определение активности пероксидазы (1.11.1.7) проводили по методу Бояркина, используя 1 M раствор бензидина в качестве субстрата. Под действием пероксидазы происходит окисление бензидина с образованием темно-синего раствора n, n' -диаминдифенилхинона. Фиксировали время от перемешивания до появления окраски, затем измеряли оптическую плотность при длине волны 750 нм.

Определение активности супероксиддисмутазы (1.15.1.1) проводили спектрофотометрически при длине волны 560 нм. Показателем активности фермента является уменьшение скорости восстановления нитросинового тетразолиевого супероксидными радикалами.

Выборка из 20 растений была использована для изучения биометрических параметров. Количество пигментов и активность ферментов определяли в выборке из 5 растений.

Результаты исследования и их обсуждение

Как было отмечено ранее, существует немало сортов и сортообразцов амаранта, различающихся по количеству синтезируемого беталаинового пигмента и по месту его локализации. Для изучения свойств амарантина были выбраны два сорта — краснолистный и зеленолистный. Растения выращивались в открытом грунте в условиях Московской области.

Изучение содержания пигментов проводилось на стадии взрослых растений перед цветением.

Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1

Количество пигментов в сортах амаранта

Амарант	Амарантин (мг/г)	Каротиноиды (мкг/г)	Суммарное кол-во хлорофилла <i>a + b</i> (мг/г)
Краснолистный сорт	0,44 ± 0,02	33,17 ± 0,29	8,02 ± 0,08
Зеленолистный сорт	0,001 ± 0,03	47,34 ± 0,41	14,98 ± 0,12

Таким образом, при отсутствии беталаиновых пигментов количество каротиноидов в зеленолистных сортах почти в полтора раза (1,43) превышает аналогичный показатель у краснолистного сорта, а количество хлорофиллов почти вдвое больше, чем у краснолистного сорта.

Амарантин, как и все бетацианины, оказывают положительное влияние на ростовые процессы растений. Молекулярным механизмом такой регуляции является ингибирование фермента оксидаза индолилуксусной кислоты. Сравнивая сорта амаранта, отличающиеся высоким содержанием амарантина и, как следствие, яркоокрашенные, с сортами, содержащими небольшое количество амарантина (яркие полосы на листовой пластинке), можно отметить у них разный уровень биологической и фотосинтетической активности. Так, растения с высоким количеством амарантина отличаются высокой скоростью роста на начальных этапах онтогенеза, тогда как на стадии бутонизации рост растений замедлялся. Растения амаранта с зелеными листьями или слабоокрашенные проявляли обратную динамику: на начальных стадиях рост растений был достаточно медленный, а на стадии бутонизации биологическая и фотосинтетическая активность таких сортов возрастала. Такая закономерность проявлялась при выращивании растений в условиях открытого грунта (Московская область) и при выращивании в теплицах.

Таким образом, можно говорить о том, что высокая интенсивность синтеза амарантина снижает фотосинтетическую активность растений. Для объяснения такого явления необходимо отметить, что амарантин синтезируется из глюкозы и тирозина, которые являются фотосинтетическими метаболитами. Следовательно, большое количество фотосинтетических метаболитов направляется на синтез беталаиновых пигментов, что приводит к торможению ростовых процессов [4].

Известно, что гормоны растений (ауксины) оказывают влияние на скорость деления клеток, а значит, и на скорость роста растений и размеры листовой пластинки и растения в целом. Определение уровня содержания некоторых ауксинов в растениях амаранта с яркоокрашенными листьями и в зеленолистных растениях показало, что содержание пигмента обратно коррелирует с содержанием индолиуксусной кислоты (ИУК) и абсциссовой кислоты (АБК) (табл. 2).

Таблица 2

Содержание амарантина и ауксинов в сортах амаранта

Амарант	Амарантин (мг/г сухой массы)	ИУК (н грамм/г сухой массы)	АБК (н грамм/г сухой массы)
Краснолистный сорт	7,08 ± 0,73	260 ± 11,24	297 ± 5,39
Зеленолистный сорт	1,37 ± 0,04	875 ± 21,67	993 ± 22,35

Скорее всего, амарантин и ауксины конкурируют между собой, так как они имеют общих предшественников в своем синтезе по шикиматному пути (ароматические кислоты). Таким образом, амарантин оказывает влияние на ростовые процессы растений.

Следующей задачей исследования было *определение активности ферментов-антиоксидантов (пероксидазы и супероксиддисмутазы)*.

Определение активности ферментов проводилось на стадии семян, на стадии 5 листьев и на стадии 10–15 листьев (перед цветением).

У всех изученных сортов минимальное значение пероксидазы наблюдается на стадии семян, по мере роста растения активность фермента увеличивается. При этом у взрослого растения зеленолистного сорта активность фермента в 3 раза превышает этот показатель по сравнению с краснолистным сортом.

Удельная активность пероксидазы у сортов амаранта представлена на диаграмме (рис. 5).

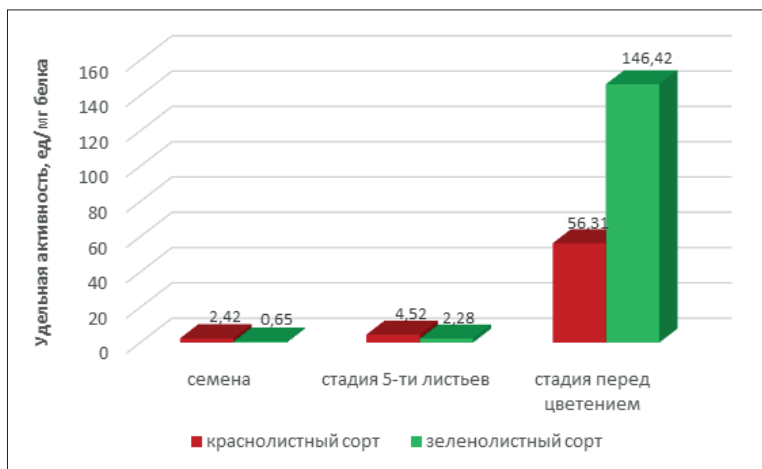


Рис. 5. Удельная активность пероксидазы у сортов амаранта

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что пероксидаза может являться неспецифической оксидазой амарантина. Кроме того, кислая пероксидаза (рН 4,8), которую мы изучали, обладает наибольшим сродством к бензидину в качестве субстрата. Эти пероксидазы связаны с клеточной стенкой и участвуют в лигнификации. А шикиматный путь синтеза амарантина приводит к образованию таких продуктов, как лигнин и ИУК, которые конкурируют с образованием пигмента.

Активность супероксиддисмутазы у изученных сортов имела одинаковую динамику: минимальное значение было отмечено на стадии 5 листьев, по мере взросления активность фермента повышалась, причем у зеленолистного сорта данный параметр был вдвое больше, чем у краснолистного.

Удельная активность супероксиддисмутазы у сортов амаранта представлена на диаграмме (рис. 6).

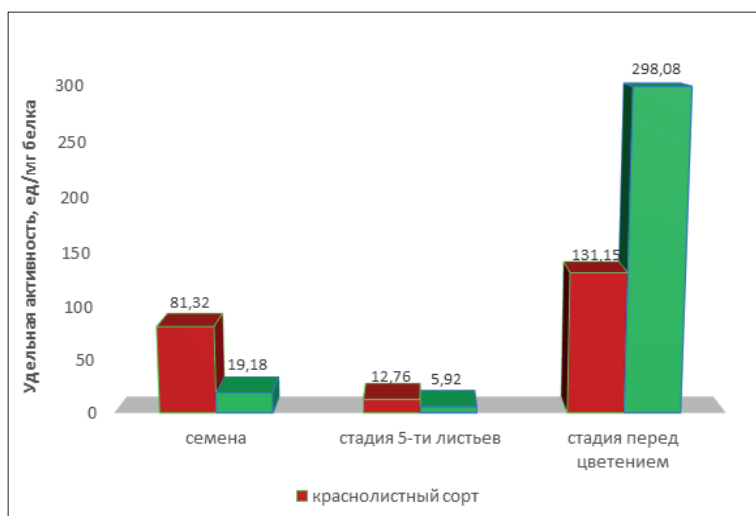


Рис. 6. Удельная активность супероксиддисмутазы у сортов амаранта

Таким образом, краснолистный сорт амаранта (содержащий беталаиновый пигмент) характеризуется низкой активностью изученных оксидоредуктаз, тогда как в зеленолистном сорте активность ферментов значительно выше.

Сопоставляя полученные нами результаты с литературными данными, можно говорить о том, что снижение антиоксидантного потенциала ферментов по мере взросления растений сопровождается повышением уровня синтеза беталаиновых пигментов, которые также обладают антиоксидантной активностью.

Влияние фитогормонов на активность ферментов может осуществляться посредством регуляции синтеза молекул ферментов. Как уже было отмечено, пероксидаза обладает и ИУК-оксидазной активностью. При этом пероксидаза может принимать участие и в синтезе ИУК.

Для изучения влияния индолилуксусной кислоты на активность оксидоредуктаз использовали семена. Было проведено исследование по изучению влияния индолилуксусной кислоты на активность ферментов двух сортов амаранта: амаранта краснолистного (содержащего амарантин) сорта амаранта и зеленолистного (лишенного пигмента) сорта. Семена амаранта замачивали в растворах ИУК разных концентраций ($10^{-4} M$, $10^{-5} M$, $10^{-6} M$, $10^{-7} M$, $10^{-8} M$, $10^{-9} M$, $10^{-10} M$). Время замачивания составляло 24, 48 и 72 часа. В качестве контроля изучали семена, замоченные в воде. Активность ферментов определяли по описанным выше методикам.

Активность ферментов-оксидоредуктаз (пероксидазы, супероксиддисмутазы) у двух сортов амаранта возрастает по мере увеличения времени замачивания семян в воде. Это свидетельствует о том, что эти ферменты принимают участие в регуляции ростовых процессов. Выявленные закономерности полностью коррелируют с литературными данными. Сравнивая активность ферментов у краснолистного и зеленолистного сорта амаранта, можно отметить, что у зеленолистного растения активность фермента изначально выше, чем у краснолистного (см. табл. 3).

Таблица 3

Активность ферментов амаранта при замачивании в воде

Продолжительность замачивания, ч	Пероксидаза		Супероксиддисмутаза	
	краснолистный сорт	зеленолистный сорт	краснолистный сорт	зеленолистный сорт
24	$1,79 \pm 0,02$	$9,03 \pm 0,02$	$57,75 \pm 0,18$	$144,81 \pm 1,12$
48	$7,13 \pm 0,04$	$11,39 \pm 0,05$	$101,61 \pm 1,14$	$196,13 \pm 1,72$
72	$101,53 \pm 0,13$	$133,07 \pm 0,26$	$113,53 \pm 1,37$	$243,59 \pm 3,18$

Примечание: активность — единиц/г ткани.

Замачивание семян амаранта краснолистного сорта в растворах ИУК разных концентраций показало, что максимальное изменение активности ферментов вызывает раствор гормона концентрацией $10^{-6} M$. Причем супероксиддисмутаза менее чувствительна к действию ИУК по сравнению с пероксидазой — активность СОД возрастает в 1,5 раза, тогда как пероксидаза активируется почти в 8 раз. Это может быть связано с тем, что в семенах основным антиоксидантом является именно пероксидаза как фермент, имеющий широкий спектр субстратов, тогда как СОД начинает синтезироваться на более поздних стадиях развития.

Замачивание семян двух сортов на 48 часов в тех же концентрациях гормонов вызвало увеличение активности пероксидазы, однако активность супероксиддисмутазы начинает снижаться. Возможным объяснением этой закономерности может быть участие пероксидазы в процессах клеточной пролиферации. Длительное замачивание (72 часа) вызывает снижение активности изучаемых ферментов.

Таким образом, замачивание семян краснолистного сорта амаранта в ИУК оптимально при времени экспозиции 24 часа и концентрации гормона 10^{-6} М.

Замачивание семян зеленолистного сорта амаранта на сутки приводит к уменьшению активности как супероксиддисмутазы, так и пероксидазы. Наибольшее действие также оказывает концентрация гормона 10^{-6} М.

Действие индолилуксусной кислоты в течение 48 и 72 часов также приводит к снижению активности изучаемых ферментов.

Заключение

Разные виды и сорта амаранта различаются по содержанию пигмента амарантина. Отсутствие амарантина приводит к более высокому содержанию каротиноидов, которые также обладают протекторными свойствами. Конечно, селекция амаранта направлена на получение сортов с высоким уровнем синтеза беталаиновых пигментов.

Было отмечено, что повышение интенсивности биосинтеза амарантина приводило к тому, что в растениях снижалось количество ауксинов и фенольных соединений. Это свидетельствует о том, что синтез основного предшественника амарантина — тирозина — является конкурентным относительно синтеза ауксинов и фенольных соединений в шикиматном пути биосинтеза.

По мере роста растений активность ферментов оксидоредуктаз возрастает, однако у краснолистных сортов амаранта (содержащих амарантин) антиоксидантный потенциал ферментов ниже, чем у зеленолистных сортов, что также свидетельствует о том, что беталаиновые пигменты проявляют антиоксидантную активность.

Известно, что при действии на растения стрессоров меняется активность ряда ферментов, в частности оксидоредуктаз. Логично предположить, что, если амарантин является антиоксидантом, его количество будет коррелировать с активностью таких ферментов (например, пероксидазы КФ 1.11.1.7).

Субстратами пероксидазной активности могут быть ароматические амины, тирозин, триптофан, индол, индолилуксусная кислота (ИУК), фенолы (катехин, гидрохинон, резорцин, гваякол, ванилин, *p*-крезол, пирогаллол), ароматические кислоты [3]. А, как уже было отмечено, тирозин является предшественником для синтеза беталаинов, поэтому активность пероксидазы коррелирует с количеством амарантина. У зеленолистных растений активность фермента высокая, а индуцированные стрессы приводят к еще большему повышению активности пероксидазы. Тогда как у краснолистных растений фиксируется незначительный уровень активности пероксидазы, однако при бутонизации, когда синтез пигмента снижается, активность фермента, наоборот, повышается.

Как уже было отмечено, амарантин может подвергаться действию оксидоредуктаз, при этом и ферменты, и пигмент проявляют антиоксидантные

свойства. Также количество пигмента определяет скорость роста растений. В связи с этим представляет интерес изучение влияния экзогенных фитогормонов на активность ферментов оксидоредуктаз.

Замачивание семян краснолистного и зеленолистного сортов амаранта в растворах индолилуксусной кислоты показало, что активность антиоксидантных ферментов снижается при любой концентрации и времени действия гормона у зеленолистных растений. Однако у краснолистных сортов воздействие ИУК в течение суток приводит к повышению активности ферментов. Это может быть связано с тем, что краснолистные сорта обладают более высокой интенсивностью роста, пероксидаза принимает участие в клеточной пролиферации.

У растений с невысокой активностью антиоксидантных ферментов идет накопление беталаиновых пигментов, которые также проявляют антиоксидантную активность. Амарантин принимает участие в защите растений от действия стрессовых факторов: низких температур, УФ-облучения, патогенных организмов.

Следует отметить, что на первых этапах индуцированного стресса количество амарантина возрастает. Это доказывает, что пигмент проявляет протекторные свойства сразу при действии стрессора, тогда как другие антиоксиданты (например, каротиноиды) защищают компоненты уже в гидрофобной среде. Амарантин оказывает сильное физиологическое действие на живые организмы, в малых количествах оказывая стимулирующее действие, а в больших — подавляя рост и развитие организмов, особенно микроорганизмов и нематод [5].

При выращивании растений амаранта в открытом грунте неоднократно отмечалось, что у краснолистных растений при действии первых заморозков листья теряли ярко-красную окраску за счет разрушения пигмента, но при этом хлорофиллы и каротиноиды продолжали функционировать. Но при действии пониженных температур на растения с небольшим количеством беталаинового пигмента разрушению подвергались хлорофиллы и каротиноиды, то есть нарушалась фотосинтетическая деятельность растения в целом. Таким образом, можно утверждать, что растения с беталаиновыми пигментами более стрессоустойчивы по сравнению с зелеными растениями.

В целом следует отметить, что изучение физиологических функций амарантина продолжается. Есть свидетельства того, что амарантин принимает участие в защитной системе растений. Воздействие разного рода стрессорами (высокие и низкие температуры, УФ-облучение, гипоксия) приводит к изменению активности биосинтеза амарантина (у краснолистных растений) или вызывает изменения в активности защитных ферментов (у зеленолистных растений). Так, индуцирование образования активных форм кислорода и свободных радикалов приводит к снижению количества пигмента в частях растения, которые уже закончили свой рост. А в активно растущих растениях снижение содержания амарантина менее ярко выражено. Поэтому можно говорить

о способности беталаиновых пигментов подавлять образование активных форм кислорода и свободных радикалов.

Таким образом, дальнейшее изучение физиологической активности беталаиновых пигментов (бетацианинов и бетаксантинов) представляется очень актуальным и значимым направлением.

Список источников

1. Валеева Д. И. Влияние pH среды на концентрацию беталаиновых пигментов растительного происхождения / Д. И. Валеева, Х. Саттиходжаев, К. Ю. Швинк [и др.] // Научное обозрение. Фундаментальные и прикладные исследования. 2019. № 2.
2. Войно Л. И. Антимикробное и фунгицидное действие экстрактов амаранта / Л. И. Войно, М. С. Гинс, И. В. Гришакова [и др.] // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их практического использования: материалы IV Международного симпозиума. М.: РУДН, 2001. С. 431–432.
3. Гинс М. С. Биологически активные вещества амаранта. Амарантин: свойства, механизмы действия и практическое использование: монография. М.: РУДН, 2002. 183 с.
4. Захарова Н. С., Петрова Т. А., Бокучаева М. Х. Беталаиноксидаза и беталаиновые пигменты в проростках столовой свеклы // Физиология растений. 1989. Т. 36. Вып. 2. С. 339–343.
5. Пивоваров В. Ф., Гинс М. С. Изучение механизма антиоксидантной активности амарантина из листьев амаранта // Тезисы Международной научно-практической конференции МАИ. М., 1998. С. 113–118.
6. Чурикова В. В., Владимирова И. Н. Исследование зависимости синтеза амарантина от активности фенолоксидазы в проростках амаранта // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их практического использования: материалы I Международного симпозиума. М.: Пушино, 1995. С. 15–16.

References

1. Valeeva D. I. Influence of medium pH on the concentration of plant-derived betalaine pigments / D. I. Valeeva, Kh. Sattedzhaev, K. Y. Schwink [et al.] // Scientific Review. Basic and applied research. 2019. № 2.
2. Voino L. I. Antimicrobial and fungicidal effects of amaranth extracts / L. I. Voino, M. S. Gins, I. V. Grishakova [et al.] // New and unconventional plants and prospects for their practical use. Proceedings of the IV International Symposium. Moscow: RUDN, 2001. P. 431–432.
3. Gins M. S. Biologically active substances of amaranth. Amarantine: properties, mechanisms of action and practical use. Monograph. Moscow: RUDN, 2002. 183 p.
4. Zakharova N. S., Petrova T. A., Bokuchaeva M. H. Betalainoxidase and betalaine pigments in seedlings of beet table // Plant physiology. 1989. T. 36. № 2. P. 339–343.
5. Pivovarov V. F., Gins M. S. Study of the mechanism of antioxidant activity of amarantine from amaranth leaves // Theses of the International scientific and practical conference of the IAI. Moscow, 1998.
6. Churikova V. V., Vladimirova I. N. Study of the dependence of amarantine synthesis on phenol oxidase activity in amaranth seedlings // New and unconventional plants and prospects for their practical use. Proceedings of the I International Symposium. Moscow: Pushchino. 1995. P. 15–16.