

AMARANTH – THE CULTURE OF XXI CENTURY

T. V. CHIRKOVA

The biological peculiarities of amaranth, a new perspective for Russia and highly productive grain culture are considered. This crop is enriched by a high-quality proteins and is capable to supply people with food, medicines and with forage for animals. The data are submitted about the C₄-photosynthesis of amaranth, as well as its unique ability to be adapted to different environmental conditions.

В статье рассмотрены биологические особенности новой для России, перспективной зерновой высокопродуктивной культуры – амаранта. Эта культура богата качественным белком и способна обеспечить человека пищей, лекарствами, кормами для животных. Представлены данные о механизме фотосинтеза C₄-растений, к которым относится амарант, а также об его уникальной особенности адаптироваться к различным условиям внешней среды.

© Чиркова Т.В., 1999

АМАРАНТ – КУЛЬТУРА XXI ВЕКА

Т. В. ЧИРКОВА

Санкт-Петербургский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Амарант (от греч. – вечный, неувядающий) – новая для нашей страны культура, привлекающая к себе внимание исследователей и практиков сельского хозяйства богатством и сбалансированностью белка, удивительно высокой урожайностью, повышенным содержанием витаминов, минеральных солей. В XXI веке это растение способно занять ведущее положение не только в качестве продовольственной и кормовой, но также и лекарственной культуры. Кроме того, в связи с ожидаемыми глобальными изменениями климата на Земле использование амаранта становится еще более актуальным благодаря его уникальной особенности приспосабливаться к различным условиям внешней среды. Поскольку эта культура пока мало известна, цель статьи состоит в ознакомлении читателя со своеобразием биологии и физиологии амаранта, особенно в связи с его высоким адаптационным потенциалом.

ОБ ИСТОРИИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ АМАРАНТА

В доколумбовые времена зерновой амарант был одной из основных пищевых культур Нового Света, почти такой же важной, как кукуруза и фасоль. Помимо употребления в пищу ацтеки и инки использовали амарант как источник пурпурной краски в языческих обрядах. С приходом испанских конкистадоров и внедрением христианства языческие ритуалы стали вытесняться, в том числе и имеющий к ним отношение амарант. Основными продовольственными культурами остались кукуруза и фасоль, а амарант был почти забыт. Так испанские завоеватели положили конец использованию амаранта как основной продовольственной культуры Нового Света, что значительно замедлило его распространение в мировом сельском хозяйстве как высокопитательного продукта.

Возобновление интереса к амаранту относится уже к XX веку. В настоящее время он широко распространен в Северной и Южной Америке, Азии (Индия, Китай), Африке. Его стали изучать, возделывать и использовать в пищу в Европе. В нашей стране на необходимость применения в сельском хозяйстве амаранта как новой силосной культуры в программе использования мировых растительных ресурсов указывал академик Н.И. Вавилов еще в 1932 году. Однако после его гибели начатая по его инициативе исследовательская работа с амарантом и другими новыми культурами была прекращена. И только в последние годы благодаря усилиям



Рис. 1. Поле амаранта с цветущими метелками

заведующего лабораторией фотосинтеза Биологического научно-исследовательского института Санкт-Петербургского государственного университета профессора И.М. Магомедова амарант стали интенсивно внедрять в сельское хозяйство в России и странах бывшего СССР. Научно-исследовательские работы с амарантом наиболее активно ведут в Санкт-Петербургском и Казанском университетах. Создана Европейская ассоциация “Амарант”, президентом которой избран И.М. Магомедов.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ КАЧЕСТВА АМАРАНТА

Из всех известных в мире культур лишь около 20 используются человечеством для получения достаточного объема калорий и белка. Наибольший вклад в обеспечение человека пищей вносят пшеница, кукуруза, просо, сорго, картофель, батат, маниока, фасоль, соя, земляной орех, сахарный тростник, сахарная свекла, бананы. Однако это только малая часть из известных съедобных растений. Их включение в пищевой рацион необходимо для разнообразия и обогащения пищи. Именно к таким культурам относится амарант. Известно 60 видов рода *Amaranthus* (семейство *Amaranthaceae*), большинство из них считаются сорными растениями, 12 видов окультурены и используются как овощные, зерновые, кормовые и декоративные растения.

Амарант – это однолетнее пурпурно- или желто-зеленое травянистое растение, высота которого может достигать 2,5–4 м (рис. 1). Метелка в зрелом состоянии имеет длину 30 см и диаметр 15 см. Вес одной метелки доходит до 1 кг (рис. 2). Семена амаранта очень малы, подобно песчинкам, а число их огромно (до 500 тыс. в одной метелке). Зерновой амарант дает семена, по характеристикам и свойствам сходные с зерном злаков, однако, поскольку он не принадлежит к семейству злаковых, его называют псевдозлаком. Среди зерновых видов наиболее изучены *A. cruentus* L., *A. hypochondriacus* L., *A. cau-*



Рис. 2. Метелка амаранта метельчатого (*Amaranthus cruentus* L.)

datos L., поскольку именно их в основном используют в пищу.

Семена амаранта содержат в среднем 15–17% белка, 5–8% масла и 3,7–5,7% клетчатки, что выше, чем у большинства зерновых культур (для сравнения: содержание белка у кукурузы составляет 10–12,6%, жиров – 4,6–6,7, у риса белок – 8, жиры – 1,1, у пшеницы белок – 9–14, жиры – 1,1–3,4%). Из-за значительного содержания аминокислоты лизина, которого в белке амаранта в два раза больше, чем у пшеницы, и в три раза больше, чем у кукурузы и сорго, и даже сопоставимо по количеству с соей и коровьим молоком, качество белка амаранта считается очень высоким. Как известно, лизин является ценной незаменимой аминокислотой, так как в

животных тканях он не может синтезироваться, и человек и животные получают его только из растений. Если оценить идеальный белок (близкий к яичному) в 100 баллов, то молочный белок казеин будет иметь 72 балла, соевый — 68, пшеницы — 58, кукурузы — 44, а амаранта — 75 баллов.

Семена амаранта являются также источником для производства масла и сквалена. Сквален — это углеводород, производное изопрена, предшественника тритерпенов и стероидных соединений. Его содержание в масле амаранта составляет 8%. Он может использоваться для производства стероидных гормональных препаратов, для профилактики онко- и кардиозаболеваний, для косметических целей. Масло амаранта отличается высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот по сравнению с насыщенными, что приближает его по качеству к облепиховому. Кроме того, в семенах содержится много токоферола (витамина Е), обладающего антиоксидантным действием. Токоферолы можно использовать, в частности, как лекарство для снижения холестерина в крови. Зерно амаранта в отличие от других зерновых содержит очень мало глютелинов. Это важно для питания тех, кто обладает повышенной чувствительностью к зерновым из-за отсутствия у них ферментов, гидролизующих глютелин, и поэтому нуждаются в аглютелиновой диете. Углеводный компонент крахмала семян интересен тем, что его гранулы очень малы и удобны для использования в аэрозолях в качестве наполнителя в пищевых продуктах или заменителя талька для производства косметических средств.

Семена амаранта в виде муки, имеющей запах ореха, или крупы могут быть использованы как пищевые (5–20%) добавки для производства многих диетических продуктов: каш, хлебобулочных, макаронных и кондитерских изделий. Эта продукция полезна для больных сердечно-сосудистыми заболеваниями и раком, для работающих в экологически вредных условиях среды, а также для всех желающих сохранить свое здоровье.

Овощной амарант как листовая овощная культура особенно широко распространен в Индии, Китае, странах Африки. Показано, что 150–200 г листьев амаранта эквивалентны по качеству 1 кг помидор или огурцов. В листьях амаранта накапливается до 29% в расчете на сухую массу высококачественного белка. Наибольшего содержания белок достигает к 60-му дню после появления всходов, однако, исходя из количества и качества различных веществ, уборку рекомендуют производить через 45 дней. В листьях амаранта содержится гораздо больше, чем во многих овощных и бахчевых культурах, аскорбиновой кислоты и каротина (68 и 5,7 мг на 100 г сырой массы соответственно). Больше витамина С (в расчете на 100 г сырой массы) накапливают только такие культуры, как лук (от 35 до 95 мг), хрен (от 98 до 153 мг), сельдерей (от 18 до 180 мг), петрушка (от

58 до 290 мг) и шпинат (от 37 до 178 мг). Из зеленых частей амаранта готовят салаты или используют их для гарниров, добавок к соусам и т.п. Листья можно подвергать сушке, и полученный листовой концентрат добавлять в различные блюда как для улучшения их качества, так и с профилактическими целями.

Кормовой амарант в виде зеленой массы или зерна используют для получения качественного корма, силоса, в производстве витаминной муки и гранул. Зеленую массу хорошо поедают все домашние животные. Амарантом кормят уток, кур, кроликов, свиней, коров. Введение в рацион амаранта способствует увеличению поголовья, повышению количества и качества продукции и снижению ее себестоимости. Урожайность амаранта составляет 35–60 ц/га зерна и максимально до 2000 ц/га биомассы. Важно также, что для посева требуется всего 0,5–1 кг семян на 1 га. Для посева же пшеницы необходимо 200 кг, а кукурузы — 50 кг зерна на 1 га.

С помощью амаранта можно повысить плодородие почвы. При скашивании и последующем запаривании он может служить прекрасным сидератом — зеленым органическим удобрением. Нельзя не упомянуть и о возможности использования амаранта в декоративных целях, поскольку его пышные, ярко окрашенные в красный или желтый цвет соцветия очень красивы.

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АМАРАНТА

Своеобразие амаранта определяется в значительной степени типом его фотосинтеза. Подобно кукурузе, сорго, просо, сахарному тростнику, амарант обладает C_4 -путем фотосинтеза. Вместе с тем в отличие от перечисленных растений, которые представляют собой малатные формы, амарант относится к аспартатным представителям C_4 -растений, так как первичными продуктами фотосинтеза у него являются дикарбоновые четырехуглеродные аминокислоты, к которым относится аспарагиновая кислота. Аспартат — исходное соединение для образования лизина, высоким содержанием которого отличается амарант. Как C_4 -растение, то есть растение тропического происхождения, амарант характеризуется большой скоростью фиксации углекислоты в расчете на единицу поверхности листа, быстро растет и развивается, обладает мощной продуктивностью при условии высокой инсоляции и температуры [1].

Листья C_4 -растений содержат два типа хлоропластов: хлоропласты обычного гранального вида в мезофильных клетках и большое количество крупных хлоропластов, обладающих или мелкими гранами или совсем не имеющих их, — в клетках, окружающих проводящие пучки (обкладка) [2]. CO_2 , диффундирующий в лист через устьица, попадает в цитоплазму клеток мезофилла, где при участии фосфоенолпируват (ФЕП)-карбоксилазы

взаимодействует с ФЕП, образуя четырехуглеродную щавелевоуксусную кислоту (ЩУК) или оксалоацетат (рис. 3). В присутствии аммиачной формы азота ЩУК в цитоплазме превращается в аспарат, что характерно для амаранта. Затем аспарат переносится в митохондрии клеток обкладки, где дезаминируется, а образовавшаяся ЩУК восстанавливается до малата (яблочной кислоты), последний декарбоксилируется до пирувата и CO_2 . Углекислота поступает в хлоропласты, взаимодействует с рибулозобисфосфатом (РБФ) и включается в основной C_3 -путь фотосинтеза – цикл Кальвина. Пируват же аминирован с помощью аминотрансфераз в цитоплазме клетки обкладки, и образующийся при этом аланин перемещается обратно в хлоропласты клеток мезофилла, где после дезаминирования образует пируват. Последний в результате взаимодействия с АТФ и ГТФ может снова превращаться в первичный акцептор углекислоты – ФЕП.

Такое пространственное разделение процессов позволяет растениям с C_4 -путем фотосинтеза осуществлять фиксацию углекислоты даже при относительно закрытых устьицах, поскольку хлоропласты

клеток обкладки используют малат (или аспарат), образовавшийся ранее, в качестве доноров углекислоты. Фиксация CO_2 с участием ФЕП и образованием малата или аспартата служит своеобразным насосом для поставки CO_2 в хлоропласты обкладки, функционирующие по C_3 -пути.

ФЕП-карбоксилаза обладает большим сродством к углекислоте, благодаря чему способна интенсивно использовать CO_2 даже при его низких концентрациях, что происходит при полузакрытых устьицах. Интересно, что и сопротивление мезофилла диффузии CO_2 у C_4 -растений значительно меньше: оно составляет 0,3–0,8 см/с, в то время как у C_3 -форм – 2,8 см/с [1].

Кроме того, ФЕП-карбоксилаза отличается более высоким температурным оптимумом по сравнению с РБФ-карбоксилазой – основным ферментом C_3 -пути (30–45° по сравнению с 15–25°), что обеспечивает высокую интенсивность фотосинтеза C_4 -растений при повышенных температурах. Амарант, в частности, способен фотосинтезировать даже при температуре выше 50°С. Минимальные температуры, при которых начинает осуществляться фотосинтез у амаранта, 12–15°С.

Светонасыщение C_4 -фотосинтеза также происходит при более высоких значениях интенсивности света, чем у C_3 -растений. Так, у C_3 -растений интенсивность фотосинтеза перестает увеличиваться при 50% от полного солнечного освещения, то есть при 950 Вт/м², в то время как у C_4 -форм этого не происходит. Такие особенности C_4 -растений, в том числе у амаранта, объясняют высокую интенсивность их фотосинтеза и продуктивность при повышенных температуре и освещенности. Показано, что C_3 -растения ассимилируют на полном солнечном свете CO_2 со скоростью 1–50 мг/дм² · ч, а C_4 -растения – со скоростью 40–80 мг/дм² · ч [1]. Высокая потенциальная продуктивность амаранта может быть реализована именно при полном солнечном освещении и высокой температуре.

Выяснение механизма фотосинтеза C_4 -растений делает понятным и еще одну особенность физиологии амаранта – высокую засухо-, термо- и солеустойчивость. Некоторые исследователи считают даже, что возникновению C_4 -фотосинтеза способствовали ксероморфные, то есть засушливые, условия окружающей среды [1]. Выше отмечалось, что у C_4 -растений фотосинтез может осуществляться и при почти закрытых устьицах. Закрывание устьиц на наиболее жаркое время дня сокращает потери воды за счет транспирации (испарения). Однако эффективность использования воды, то есть отношение массы ассимилированного CO_2 к массе воды, израсходованной при транспирации у C_4 -растений, может быть вдвое выше, чем у C_3 -растений. Понятно поэтому, что C_4 -растения имеют преимущество перед C_3 -растениями в засушливых местах обитания

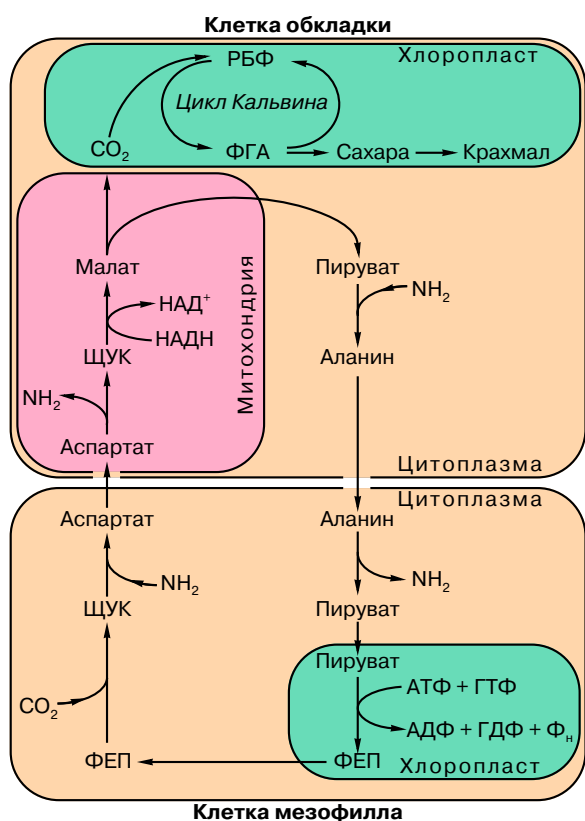


Рис. 3. Схема C_4 -фотосинтеза у амаранта: РБФ – рибулозобисфосфат; ФГА – фосфоглицериновый альдегид; ФЕП – фосфоенолпируват; ЩУК – щавелевоуксусная кислота

благодаря высокой интенсивности фотосинтеза даже при закрытых устьицах.

Основная причина пониженного расхода воды C_4 -растениями состоит в том, что их устьица оказывают высокое сопротивление диффузии газов, причем при подвядании листьев и сжатии устьиц оно многократно возрастает для паров воды и в меньшей степени для CO_2 . Низкая величина сопротивления диффузии клеток мезофилла для CO_2 при более высоком сопротивлении устьиц для H_2O благоприятствует повышению интенсивности фотосинтеза при пониженной транспирации у C_4 -растений. Что касается амаранта, то он регулирует транспирацию активными движениями замыкающих клеток устьиц, более или менее плотно замыкая их в полуденные часы. Опасность перегрева листьев ему практически не угрожает из-за высокой термоустойчивости. Не снижается и интенсивность фотосинтеза, но расход воды значительно сокращается, что сказывается на высокой эффективности использования им воды [3].

Максимальная продуктивность амаранта обуславливает особую требовательность его к минеральному питанию [3]. По потребности в питательных веществах амарант значительно превосходит даже кукурузу, тоже относящуюся к C_4 -растениям. Средний вынос минеральных веществ в расчете на 100 ц зеленой массы составляет: по азоту 25–30 кг, калию 75–85, фосфору 18–22, кальцию 35–40, магнию 16–18 кг. Исходя из этих потребностей амаранта определяют конкретные дозы удобрений. Урожай зерна достигает 60 ц/га при внесении в почву не менее 200 кг/га азота.

Исследование взаимодействия между элементами минерального питания и функционированием C_4 -пути углерода показало, что эффективность использования азота C_4 -растениями выше, чем C_3 -формами [4]. C_4 -растения характеризуются более высокой скоростью фотосинтеза и образования биомассы на единицу азота в листе. Большая эффективность использования азота у аспаргатовых форм C_4 -растений может определяться наличием тесной связи ассимиляции CO_2 с биосинтезом аминокислот [4]. Быстрому перемещению соединений азота способствует взаимодействие клеток мезофилла и обкладки, которое обеспечивает ассимиляцию не только углерода, но и азота, а также функциональную сопряженность этих процессов [3].

Различия в ответных реакциях на форму минерального азота также могут быть обусловлены принадлежностью растений к C_3 - или C_4 -типу фотосинтеза. При выращивании C_4 -растений исключительно на аммонийной форме азота интенсивность фотосинтеза снижается примерно на 300% по сравнению с растениями, выращенными на нитратах, вследствие ингибирования активности основных ферментов C_4 -цикла [4]. При использовании в качестве единственного источника азота аммония растения амаранта, кукурузы, проса значительно отставали в

росте и развитии в течение всего онтогенеза от растений, находившихся на нитратах. Однако количество белкового азота и свободных аминокислот на аммонийном удобрении возрастало. Отмечено также, что в листьях кукурузы, выращенной на аммонии, происходило переключение потоков углерода при фотосинтезе с образования органических кислот и углеводов на синтез аминокислот и белков, то есть происходило превращение кукурузы из малатной формы в аспаргатовую [4].

При интенсивном использовании амарантом нитратной формы азота возникает опасность чрезмерной аккумуляции нитратов в его биомассе, особенно в стеблях. Поэтому важно применение оптимального сочетания различных источников азота в удобрениях, а также внесение других минеральных элементов, в частности калия и фосфора. Очень важно, что амарант активно поглощает также тяжелые металлы, радионуклиды, пестициды. Оказалось, что амарант настолько интенсивно накапливает и концентрирует эти вещества в тканях, что его можно использовать для ликвидации локальных загрязнений почв.

Подобным же образом возможно применение амаранта в фитомелиоративных целях. Для некоторых видов амаранта характерна выносливость к хлористому натрию: NaCl в концентрации до 10 мМ стимулирует рост и повышает продуктивность этих растений. Интенсивно поглощая NaCl из засоленных почв, амарант тем самым может эффективно улучшать их режим. Например, засоленные в результате поливного земледелия почвы удается рекультивировать с помощью 2–3-летнего возделывания амаранта в такой степени, что они оказываются пригодными для возделывания пшеницы.

Наряду с хорошо изученной способностью амаранта приспосабливаться к недостатку влаги и засолению в последние годы получены данные об адаптации некоторых видов амаранта к избытку влаги. Эти работы были предприняты в связи с необходимостью расширения областей культивирования амаранта, в частности выявления видов, способных расти в условиях северо-запада России, для которых характерны периоды временного переувлажнения и затопления почвы, сопровождаемые кислотной недостаточностью.

Сравнительная оценка различных видов амаранта на устойчивость к затоплению показала, что из трех изученных видов амаранта: *A. cruentus* L., *A. edulus* L., *A. caudatus* L. — наиболее устойчивым к данному воздействию оказался *A. cruentus* L. [5]. Он выдерживал почти без снижения продуктивности две недели затопления, и даже через три недели растения еще были далеки от гибели. Неустойчивый же вид амаранта (*A. edulus* L.) погибал уже через неделю пребывания в таких условиях.

Интересно, что *A. cruentus* L. проявил себя способным адаптироваться не только к недостатку

кислорода, но и к избытку ионов H^+ , то есть он лучше развивался на кислых почвах. Повышенная же кислотность является сопутствующим фактором при переувлажнении и затоплении почв.

В заключение следует подчеркнуть, что возделывание амаранта и использование его продукции в пище, в виде кормов, лекарств в настоящее время представляются жизненно необходимыми. Серьезное внимание следует обратить на экологическое значение этой культуры не только как источника диетических и экологически чистых продуктов, но и в связи с возможностью очистки и облагораживания с ее помощью почв. Обладающая высоким адаптационным потенциалом культура амаранта приобретает особое значение в настоящее время, когда экологическая ситуация на Земле существенно осложнилась из-за антропогенной деятельности человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Магомедов И.М.* Фотосинтез и органические кислоты. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 203 с.

2. *Кулаева О.Н.* Хлоропласт и его полуавтономность в клетке // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 7. С. 2–9.

3. *Чернов И.А.* Амарант – физиолого-биохимические основы интродукции. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1992. 89 с.

4. *Тищенко Н.Н., Магомедов И.М.* Взаимосвязь азотного и углеродного метаболизма у высших растений // Азотное питание и продуктивность растений. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. С. 5–48.

5. *Чиркова Т.В., Белоногова В.А., Магомедов И.М.* Оценка устойчивости различных видов амаранта к недостатку кислорода // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 3. 1992. Вып. 3 (№ 17). С. 79–82.

* * *

Тамара Васильевна Чиркова, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, доктор биологических наук. Основная область исследований – механизмы приспособления растений к недостатку кислорода и другим стрессовым воздействиям. Автор более 160 научных работ, в том числе монографии “Пути адаптации растений к гипоксии и аноксии”.