

УДК 581.19+581.1

**СПЕЦИФИКА БИОСИНТЕЗА
ВЫСОКОЛИЗИНОВОГО БЕЛКА У РАСТЕНИЙ
РОДА *AMARANTHUS L.*, СОСТАВ, СВОЙСТВА
И ТЕХНОЛОГИЯ ЕГО ВЫДЕЛЕНИЯ
ИЗ ФИТОМАССЫ АМАРАНТА**

И.А. Чернов, Г.А. Гасимова, И.А. Дегтярёва, Ю.А. Куликов

Аннотация

В представленном обзоре рассматриваются особенности состава белковых фракций фитомассы амаранта и специфика образования критических дефицитных незаменимых аминокислот, входящих в состав белков. Обсуждаются технологические аспекты извлечения белков из листостебельной массы амаранта и изменение соотношения белков и составляющих их аминокислот, происходящие в процессе экстракции из растительного сырья. Схематически представлена последовательность образования аминокислот семейства лизина.

Введение

Быстрое увеличение численности населения Земли резко опережает рост производства продуктов питания, что делает объективно необходимым в самой близкой перспективе значительное увеличение интеллектуальных и материальных затрат на углубленную разработку проблемы интенсификации производства полноценных и разнообразных продуктов питания, масштабный выпуск которых сдерживает прежде всего дефицит пищевого белка.

Как известно, русский термин «белок» соответствует синониму «протеин», предложенному 170 лет назад Мульдером, что по-гречески означает «первый», то есть наиболее важный среди прочих компонентов, необходимых для построения и функционирования живых систем. Именно белок является тем атрибутом живой материи, который благодаря своему составу и макромолекулярной архитектонике выполняет важную роль в качестве как структурного элемента всех клеток и их органоидов, так и участника и регулятора процессов жизнедеятельности.

Макромолекулы белка в наибольшей степени ответственны за наиболее важные свойства живых организмов: адаптацию к условиям обитания, иммунитет, устойчивость к экстремальным воздействиям и др.

Соотношение процессов синтеза и распада белка в живых организмах находится в состоянии динамического равновесия, чем обеспечивается более или менее оптимальный уровень белка, а депрессия синтеза, вызванная любой причиной, влечет за собой самые серьезные нарушения обмена веществ. У животных они проявляются в форме различных заболеваний, снижения иммунитета и

репродуктивного потенциала, а при длительной депрессии являются причиной сокращения продолжительности жизни.

Таким образом, исключительно важная роль белка требует самого серьезного внимания к разностороннему изучению соединений этого класса для их рационального использования. Поскольку предметом настоящего обсуждения является белковая субстанция растительного происхождения, следует напомнить, что впервые она была выделена Беккари (1728) из пшеничного теста в виде вязкого сгустка, названного клейковиной. Затем Руэль (1773), работавший в Королевском ботаническом саду Франции, получил из гомогената зеленых растений разных видов, близких по свойствам, клейковиноподобный сгусток, обладавший определенной питательной ценностью и сходством не только с клейковиной зерна пшеницы, но и казеиновой фракцией молока.

Исследованию состава и свойств растительного белка позднее были посвящены труды многих известных ученых своего времени: Мульдера, Буссенго, Либиха, Осборна, Чибнелла, Фишера и др. В последней четверти XX века один из наиболее авторитетных специалистов в этой области Н.У. Пири в предисловии к монографии, изданной на русском языке в 1980 году под названием «Белки из листьев зеленых растений», четко сформулировал три основные задачи, актуальные до настоящего времени: «...необходимы тщательное изучение и отбор сельскохозяйственных культур, пригодных для фракционирования, совершенствование технологии фракционирования и использования полученных продуктов».

Прошедшие годы не снизили, а напротив, сделали проблему растительного белка еще более острой и значимой. Совершенно ясно, что современное состояние науки еще не способствует решению задачи в обеспечении людей в растительном белке по качеству и в количественном отношении, а также в белке, трансформированном (с большими потерями) в организме животных в более полноценный и легче усваивающийся животный белок. Интенсификация животноводства, птицеводства и рыбководства требует больших количеств высококачественного кормового белка, расход которого обычно достигает 5–10 единиц на единицу массы животного белка.

Обстоятельный анализ проблемы производства растительного белка, проведенный Р. Карлсоном (1977), позволил ему сделать вполне обоснованный вывод о том, что традиционные сельскохозяйственные культуры, оставаясь главным источником растительного белка в пищевом и кормовом балансе, не в состоянии удовлетворить быстро растущих в нем потребностей, и, следовательно, необходимо искать альтернативные источники. Для интродукционных испытаний новых видов растений могут быть отобраны те, которые превосходят традиционные культуры по содержанию и качеству белка, продуктивности, технологичности возделывания и переработки, а также отсутствию веществ, вызывающих какие-либо заболевания.

Многие исследователи [3–9] к числу наиболее перспективных «новых» высокобелковых культур относят растения рода *Amaranthus L.* Некоторые виды амаранта (*A. caudatus*, *A. cruentus*, *A. hybridus L.*, *A. hypochondriacus*, *A. lividus L.*, *A. Mantegazzianus Passerini*, *A. palmeri L.*) обладают достаточно высокой продуктивностью (до 150 т/га) и при возделывании в малоблагоприятных агроэко-

логических условиях за пределами ареала. В основе столь значительной продуктивности лежит высокоэффективное взаимодействие специфического углеродного и азотного метаболизмов [10–12, 14]. Семена и фитомасса амарантовых представляют собой прекрасный корм для животных [13] в свежем, сушеном или засилосованном состоянии, а также высокотехнологичное сырье для извлечения белка и сопутствующих ценных компонентов, таких как пектин, пигменты, витамины, пищевые красители и др. Именно поэтому за последние 25 лет многие виды амаранта интродуцируются и широко используются в качестве пищевых, кормовых и лекарственных культур в странах Америки, Европы, Азии и Африки.

Комплексные исследования акклиматизации, адаптивного потенциала и физиолого-биохимических основ интродукции амаранта, начатые в Ботаническом саду Казанского государственного университета (КГУ) с 1987 года, продолжают до настоящего времени.

В настоящем обзоре представлены результаты многолетних исследований авторов, их сотрудников и аспирантов, а также использованы публикации, послужившие основой представленной концепции о ключевой роли специфического биосинтеза белка у амаранта, лежащей в основе его уникальных свойств и особенностей (интенсивного биосинтеза и значительного накопления белка, высокого адаптивного потенциала, экологической пластичности, устойчивости к действию экстремальных факторов, высокой продуктивности и др.).

История культуры, биологические, экофизиологические и агроэкологические особенности, пищевое, кормовое, лекарственное использование фитомассы

Полезные свойства амаранта известны людям *так же, как кукурузы и фасоли*, более 6 тысяч лет. Родина его – тропические и субтропические регионы Америки (Анды и Мексика), откуда амарант уже в послеколумбовские времена попал на другие континенты. Население Индии, Пакистана, Непала и Тибета считает амарант аборигенным растением и широко использует семена под местными названиями раджира («доброе зерно»), рамдана («зерно, посланное Богом») и др.

Наиболее достоверная информация о времени возделывания и возрасте семян амаранта была получена в ходе археологических раскопок, проведенных профессором Умберто Лагиглия в 1969 году в департаменте Мендоза уч. Сан-Рафаэль в Аргентине. Профессор Армандо Унзикер и Ана Плангуэлло сообщили, что семена были обнаружены в специальном сосуде в культурном слое на глубине 25 см на стоянке вблизи места древнего захоронения индейцев. Возраст семян (приблизительно 2000 лет) был достаточно точно установлен с использованием метода радиоуглеродного анализа. Хорошая сохранность семян позволила определить, что большая их часть в образце, полученном Унзикером, может быть отнесена к *Amaranthus caudatus L.*

Аборигены Америки высоко ценили достоинства амаранта. Так, племена индейцев, побеждавшие в междоусобных войнах, получали дань с побежденных не только золотом и серебром, но частично и в виде семян амаранта. В древности существовал культ амаранта с соответствующим ритуалом, включавшим

человеческие жертвоприношения. Испанские конкистадоры, насильственно насаждавшие католицизм, истребили все виды «варварских» культов, запретили коренному населению возделывание и любое использование амаранта. Поэтому почти 400 лет он оставался в забвении и тайно возделывался лишь на небольших участках в горах [4]. Лишь в середине XVIII века профессиональный интерес к амаранту проявили ботаники и, прежде всех, К. Линней.

В России изучение культурных представителей рода *Amaranthus L.* впервые было предпринято К.Ф. Ледебуром в 1844 году, но тогда еще не были известны те их биологические особенности, которые так высоко оцениваются в настоящее время [4, 6, 8].

После экспедиции по странам Латинской Америки академик Н.И. Вавилов в 1930 году за высокую продуктивность и устойчивость к неблагоприятным воздействиям прозорливо включил амарант в число растений, «подлежащих незамедлительному, широкому внедрению в культуру в СССР». К сожалению, первые попытки интродуцировать амарант в нашей стране по ряду причин не привели к успеху. Одной из них и, вероятно, главной было недостаточное знание биологии амаранта, его физиолого-биохимических особенностей.

Только после того, как в 60-е годы прошлого столетия было надежно установлено, что амарант принадлежит к группе растений с C_4 -типом фотосинтеза [15–17], интерес к нему возрос многократно. Все большее число фитофизиологов, растениеводов и агрономов разделяет мнение о том, что амаранту действительно присущи такие положительные свойства этой группы растений, как высокая продуктивность, засухоустойчивость, экологическая пластичность, и, сверх того, он обладает способностью к интенсивному синтезу и накоплению высококачественного белка [5].

Несмотря на то, что химический состав семян и зеленой массы амаранта изучен не в полной мере, ценность уже идентифицированных компонентов, его высокая продуктивность даже при малоблагоприятных условиях и значительная стрессоустойчивость вполне обоснованно позволяют отнести амарант к числу наиболее перспективных сельскохозяйственных культур.

Растения семейства амарантовых (*Amaranthaceae*) относятся к классу двудольных, порядку гвоздичных. Они включают 65 родов и около 900 видов. Наиболее распространены и известны растения рода амарант (*Amaranthus*), в составе которого около 60 видов. Первичное описание и название амаранту (от греческого – неувядающий цветок) были даны К. Линнеем (1753–1763), а в России некоторые культурные представители амаранта впервые были описаны выдающимся ботаником К. Ледебуром в 1844 году.

Родовой комплекс амаранта является очень сложным в таксономическом отношении, что отмечено в обстоятельных обзорах Ашерсона и Гребнера, Телунга и Унзикера, а также в серии публикаций А.Б. Прокофьева 1989–2000 годов. К сожалению, недостаток внимания к таксономическому аспекту, встречающийся в работах многих авторов, является довольно частой причиной путаницы, возникающей при сопоставлении результатов, полученных разными авторами для одних и тех же видов амаранта, фигурирующих под разными коллекционными шифрами и даже определяемых как разные виды.

Все культивируемые и дикорастущие (сорные) виды амаранта, как известно, обладают большим светолюбием [6, 18–20]. Поскольку амарант родом из тропиков, в естественных условиях произрастания, в широтах до 30° в обоих полушариях от экватора, он не испытывает светового насыщения. Это свойственно не только видам, распространенным в высокогорных (до 3000 м) условиях (*A. caudatus* L., *A. cruentus* L., *A. hypocondriacus* L., *A. Mantegazzianus* Passerini), но и тем, ареал которых преимущественно равнинный (*A. lividus* L., *A. palmeri* L., *A. hybridus* L., *A. dubius* L.) и не выше 1500 м.

В отличие от большинства сельскохозяйственных растений фотосинтез у амаранта в естественных условиях произрастания не достигает максимума, а его продуктивность значительно снижается при длительных периодах пасмурной погоды и соответственном снижении освещенности.

В основе высокого светолюбия амаранта лежат его исключительные принципиально важные морфофизиологические особенности.

Своеобразие габитуса культивируемых видов амаранта и оптимальная структура агроценоза определяются тем, что его стебли, одиночные или ветвящиеся (высотой 2 м и более), могут нести большое количество довольно крупных (до 250 на одно растение) листьев, чем обеспечивается высокий индекс листовой поверхности (10–12) и значительная абсорбция падающего света [21]. Более того, основная масса листьев взрослых растений имеет преимущественно планофильное расположение в пространстве. У молодого амаранта в утренние и предзакатные часы наблюдается временно принимаемая эректофильная ориентация преимущественно верхушечных листьев, и, таким образом, в течение всего светлого времени дня у растений имеется возможность максимально использовать поступающую к земной поверхности под любым углом солнечную радиацию разного спектрального состава.

К концу вегетативной фазы, по мере завершения роста стебля листья образуют три различающихся по химическому составу, размеру листовой пластинки и длине черешков формации: низовую, срединную и верхушечную, листья которой минимально затеняют нижерасположенные, что также способствует длительному осуществлению фотосинтеза с высокой интенсивностью.

В фазе бутонизации и позднее стебель амаранта, благодаря специфике строения и значительной массе, становится очень емким хранилищем воды, позволяющим обеспечивать значительные ее расходы на транспирацию, особенно в критические периоды засухи [22, 23].

Удаление верхушки стебля приводит к значительному усилению его ветвления и увеличению общей облиственности. При благоприятных условиях роста и рациональной агротехнике амарант, возделываемый для получения фитомассы в Индии, на Филиппинах, позволяет проводить до 8 укосов [24]. Фотосинтетический аппарат листьев амаранта имеет специфическую ультраструктуру, присущую и другим светолюбивым растениям с C₄-типом фотосинтеза. Исследования морфологии и анатомии листьев [15–17, 25, 31] показали, что они обладают характерной «кранц»-анатомией и систрофной локализацией хлоропластов вблизи проводящих пучков обкладки.

Листу и хлоропластам амаранта присущи, однако, и некоторые особенности, например, в выраженности диморфизма пластид в клетках мезофилла и

Табл. 1

Состав листьев шести видов амаранта [30]

Состав (% от су- хого веса)	<i>A. cru- entus</i>	<i>A. edulis</i>	<i>A. grae- cizans</i>	<i>A. hybri- dus</i>	<i>A. spino- sus</i>	<i>A. cau- datus</i>
Протеин (% N·6.25)	46.5	33.3	37.1	27.8	44.5	48.6
Жир	6.8	2.9	3.8	3.9	4.6	3.3
Клетчатка	11.1	22.9	23.2	17.5	14.1	12.8
Зола	35.4	40.7	34.7	–	33.1	35.2

обкладки, в строении и расположении устьиц и др. Устьица амаранта эффективно регулируют газообмен при высокой температуре и освещенности, что достигается ограничением переноса молекул воды при плотном смыкании клеток устьичной щели и сохранением достаточно свободного поступления молекул диоксида углерода [6]. Этой способностью дифференцированно регулировать скорость диффузии газов главным образом и объясняется низкий коэффициент расхода воды на синтез единицы синтезируемого органического вещества [20, 26, 27], приблизительно в 3 раза меньше, чем у люцерны, и в 2 раза меньше, чем у пшеницы.

При анализе литературы об амаранте обращает на себя внимание тот факт, что зарубежными исследователями довольно детально изучены белки семян [28, 29, 38], тогда как информация о белках фитомассы ограничивается данными о процентном содержании сырого протеина и аминокислот. Основные сведения о фракционном составе белков зеленой массы представлены в работах отечественных исследователей [21, 32–36]. Возможно, это объясняется тем, что за рубежом амарант изучается преимущественно в качестве зерновой культуры. На территории СНГ зерно амаранта не везде вызревает и более актуально использование на корм зеленой массы.

По содержанию белка семена амаранта несколько превосходят зерновые, а листья значительно превосходят многие кормовые культуры (14–17 и 27–48% соответственно) [37]. Содержание белка имеет видовую специфику (табл. 1), а также зависит от фазы развития растений, возраста листа и достигает максимальной величины (58%) у молодых растений.

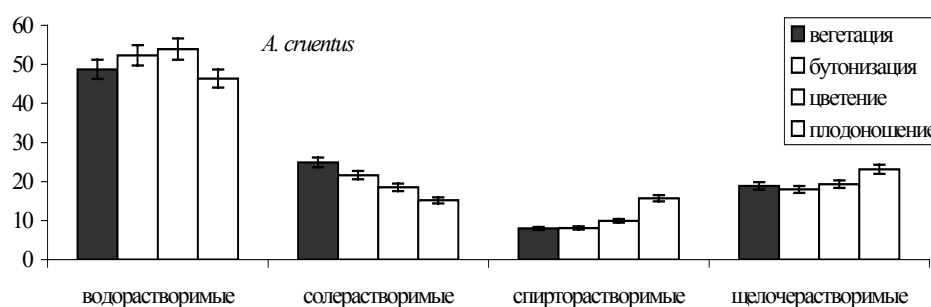
Важной характеристикой растительных белков является соотношение составляющих фракций, во многом определяющее их свойства. В отличие от низкокачественных белков зерновых злаков, ценность белка амаранта определяется преобладанием легкорастворимых в воде и слабых солевых растворах фракций альбуминов и глобулинов, не образующих клейковины, с повышенным содержанием незаменимых аминокислот (табл. 2).

Большие расхождения в оценке доли отдельных фракций (табл. 2) объясняются использованием авторами различных методов подготовки образцов и процесса экстракции, однако в большинстве случаев сумма альбуминов близка и колеблется от 60 до 80% [28–30, 38–40]. Следует отметить, что при всех использованных методах фракция проламинов имеет минорные величины.

Табл. 2

Соотношение фракций в белке семян *A. hypochondriacus* [30]

Авторы	Альбумины	Глобулины	Проламины	Глютелины	Остаток
Mitchell (1984)	48.9	13.7	7.2	8.5	21.7
Padhye, Salunkhe (1977)	65.0	17.0	11.0	7.0	–
Landry, Moreaux (1990)	A+Г = 57.3		1.4	25.8	12.1
Osborne (1924)	50.0	15.6	2.0	30.4	2.0

Рис. 1. Динамика растворимых фракций в онтогенезе *A. cruentus* L., % от суммы растворимых белков

Качественные различия белков амаранта и злаковых имеют вполне определенную связь с анатомическим строением семян, поскольку почти 65% белка у амаранта локализуется в зародыше и оболочке, тогда как доля белка в зародыше злаковых минимальна, и в большей части они представлены резервными белками эндосперма и оболочек [8, 25].

Функциональное различие белков зародыша и эндосперма или перисперма (в первом случае преобладают высокоактивные ферменты, так называемые “housekeeping proteins”, а во втором – малоактивные резервные белки) предопределено, вероятно, не только различиями в растворимости, но и различиями в аминокислотном составе и некоторыми другими.

Основная информация о фракционном составе зеленой массы представлена в работах отечественных ученых [21, 35]. Анализ данных по изучению динамики белковых фракций в онтогенезе в разные по погодным условиям годы возделывания (рис. 1) выявил следующие общие закономерности:

- основная часть растворимых белков на всех фазах развития амаранта представлена фракцией водорастворимых белков;
- доля белков солерастворимой фракции максимальна в вегетативную фазу и значительно уменьшается в период цветение-плодоношение;
- доля белков спирторастворимой фракции к концу вегетационного периода увеличивается почти вдвое;
- доля белков щелочерастворимой фракции в онтогенезе меняется незначительно.

Табл. 3

Характер распределения белковых фракций в разных органах амаранта в фазу бутонизации, % от суммы растворимых белков

Видообразец		Листья	Стебли	Метелки	Корни
<i>A. cruentus.</i>	Водораствор.	53.9 ± 4.3	46.5 ± 3.06	51.1 ± 3.87	48.6 ± 4.40
<i>A. Manteg.</i>		52.1 ± 3.7	47.3 ± 4.03	48.2 ± 2.06	50.3 ± 4.06
<i>A. cruentus</i>	Солеораствор.	20.1 ± 1.06	13.3 ± 1.02	23.4 ± 1.56	14.6 ± 1.06
<i>A. Manteg.</i>		14.8 ± 1.02	9.5 ± 0.8	20.5 ± 1.6	12.2 ± 0.74
<i>A. cruentus</i>	Спиртораств.	6.2 ± 0.42	13.7 ± 1.04	10.1 ± 0.64	16.4 ± 0.81
<i>A. Manteg.</i>		10.1 ± 0.61	13.2 ± 1.01	8.9 ± 0.62	15.2 ± 1.01
<i>A. cruentus</i>	Щелочерств.	19.8 ± 1.57	24.5 ± 1.06	18.9 ± 1.06	20.4 ± 1.34
<i>A. Manteg.</i>		23.1 ± 2.1	29.0 ± 1.06	19.2 ± 1.06	22.1 ± 1.51

Табл. 4

Содержание незаменимых аминокислот в различных белках в сопоставлении с «идеальным» белком ФАО/ВОЗ (1976)

Аминокислоты	Идеальный белок	Пшеница	Соевые бобы	Коровье молоко	Амарант
Треонин	11.1	8.9	9.8	9.4	11.4
Валин	13.9	13.5	12.2	12.3	10.6
Лейцин	19.4	20.4	19.8	20.2	14.8
Изолейцин	11.1	10.0	11.6	10.0	10.2
Лизин	15.3	8.7	16.2	16.5	16.6
Метионин	9.7	12.3	6.6	7.0	11.2
Фенилаланин	16.7	22.9	20.6	21.5	23.1
Триптофан	2.8	3.3	3.3	3.0	2.1
Скор	100	56.9	68.0	72.2	75.0

Анализ фракционного состава белковых комплексов различных органов амаранта показал (табл. 3), что качественный состав белков листьев и бутонов представлен большим количеством легкорастворимых фракций, сумма которых составляет в среднем 80%. В корнях этот показатель был несколько ниже, 63%, а в стеблях составил в среднем 58%.

Специфика усвоения и метаболизации углерода и азота в клетках амаранта обеспечивает исключительно интенсивный биосинтез и накопление значительного количества легкоусваиваемого высоколизинового белка в листьях растений рода *Amaranthus L.* (1976), в связи с чем он не только превосходит по балансу аминокислот белки других растений, включая люцерну, сорго, горох и другие, но и многие животные белки (табл. 4).

Аминокислотный состав белков фитомассы амаранта представлен в табл. 5, из которой видно, что *A. caudatus* и *A. hypochondriacus* заметно превосходят люцерну (принимаемую обычно за эталон) по содержанию лизина и метионина – критически дефицитных незаменимых аминокислот для большинства растительных белков.

Табл. 5

Содержание аминокислот (г/100 г белка) у трех видов амаранта [30]

Аминокислоты	Виды амаранта			ФАО	ВОЗ
	<i>A. caudatus</i>	<i>A. cruentus</i>	<i>A. hypochondriacus</i>	Взрослые	Дети
Цистин	2.3	2.0–3.8	2.0–3.9		
Изолейцин	3.6–4.1	3.4–3.7	2.8–3.8	1.3	4.6
Лейцин	5.9–6.3	4.8–5.9	5.0–5.8	1.9	9.3
Лизин	5.7–6.4	4.8–5.8	3.2–6.0	1.6	6.6
Метионин	2.4–3.3	1.8–1.6	0.6–1.6		
Фенилаланин	3.4–4.0	3.2–4.5	3.8–4.5		
Треонин	3.8	3.2–4.2	2.6–4.3	0.9	4.3
Триптофан	1.1	–	1.1–4.0	0.5	1.7
Тирозин	2.8	2.4–4.0	3.1–4.0		
Валин	4.1–4.7	3.9–4.3	3.2–4.2	1.3	5.5
Метионин + цистин	4.7	3.8–5.4	2.6–5.5	1.7	4.2
Фенилаланин + тирозин	6.2	5.6–8.5	6.9–8.5	1.9	7.2

Табл. 6

Содержание незаменимых аминокислот (г/100 г белка) в белковых изолятах из амаранта и других растений [30]

Аминокислоты	<i>A. retroflexus</i>	<i>A. hybridus</i>	Люцерна	Шпинат	Листовая капуста	Кукуруза
Цистин	–	1.0	–	–	–	–
Изолейцин	4.8	5.4	5.6	4.8	3.7	3.7
Лейцин	7.5	8.6	9.3	8.5	5.4	12.5
Лизин	6.2	6.8	5.9	6.4	3.8	2.7
Метионин	–	1.5	2.3	1.8	1.0	–
Фенилаланин	3.8	4.4	5.9	5.3	3.2	4.9
Триптофан	3.0	3.5	5.1	4.6	3.5	3.6
Валин	4.8	4.6	6.3	5.6	4.6	7.5

Данные свидетельствуют о более оптимальном, чем у злаковых, балансе незаменимых аминокислот в семенах амаранта по отношению к потребностям организма взрослых и детей. В белке семян амаранта больше лизина и серосодержащих аминокислот.

В табл. 6 приведены данные, из которых видно, что белковые изоляты из амаранта содержат больше лизина, чем изоляты люцерны, шпината, листовой капусты и кукурузы. Более того, белковые изоляты амаранта имеют и лучшее сочетание незаменимых аминокислот, чем изолят шпината, а поэтому представляют собой более ценный источник незаменимых аминокислот особенно, для населения стран, испытывающих недостаток животного белка.

Главная причина интенсивного биосинтеза белка и специфического набора аминокислот в белке амаранта состоит, по всей вероятности, в реализации в листьях амаранта аспартатного варианта C₄-типа фотосинтеза. Основной путь фотосинтетической ассимиляции CO₂ у амаранта с образованием аспартата в

качестве ключевого метаболита, а затем лизина и других аминокислот в общем виде может быть представлен следующей упрощенной схемой.

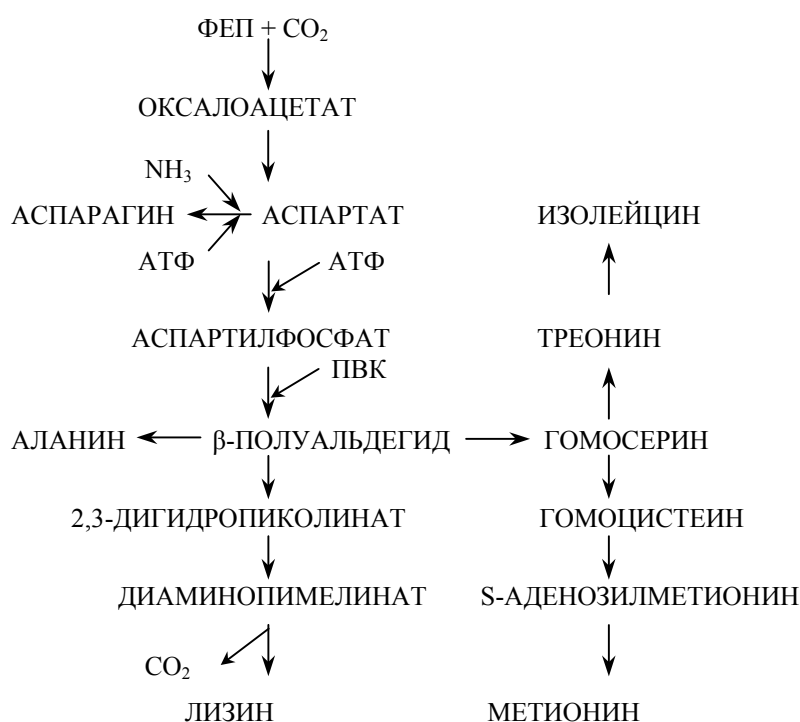


Схема образования в клетках листа амаранта протеиногенных аминокислот семейства аспартата [6, 42]

Сравнение извлекаемости белка в онтогенезе (рис. 2) выявило, что, несмотря на то, что содержание белка выше в фазу цветения, наибольший выход белков наблюдается в фазу бутонизации, поскольку этот период характеризуется высокой обводненностью растений, незначительным огрублением растительных тканей и высоким содержанием в них белков.

Пионером использования фитомассы амаранта как источника белка был Карлссон [2, 3], объективно оценивший ее в сравнении с 70 другими видами растений в соответствии с критериями Н. Пири [1] и отдавший ей предпочтение.

Следует отметить, что по содержанию белка в листьях амарант в 1.5 раза превосходит люцерну, фитомасса которой обычно используется для получения концентратов белка.

Широкие исследования специфики извлечения белковых концентратов из фитомассы амаранта методом «влажного» фракционирования были предприняты в лаборатории биоконверсии растительных ресурсов Ботанического сада КГУ. Было установлено значительное преимущество амаранта в сравнении с традиционно используемыми для этой цели культурами [43–48] и показано, что в ходе экстракции белковый концентрат освобождается от сопутствующих нитратов и оксалатов, которые в значительном количестве могут присутствовать в клеточном соке амаранта, что представляет опасность при скармливании амаранта в качестве зеленого корма молодяку сельскохозяйственных животных.

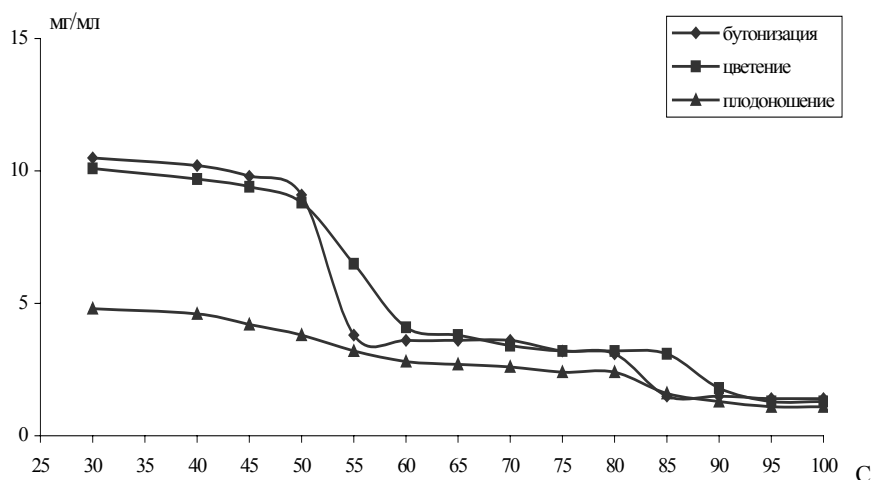


Рис. 2. Извлекаемость белка из зеленого сока амаранта при разных фазах онтогенеза [33]

Разработанные сотрудниками Ботанического сада КГУ технологии извлечения белка в достаточной степени учитывают высокие количественные и качественные показатели белка исходных тканей амаранта и имеют вполне приемлемые технико-экономические показатели. Сущность метода «влажного» фракционирования фитомассы амаранта состоит в последовательном ее измельчении (грубой при комбайновой уборке и более тщательной на месте переработки). От степени гомогенизации растительных тканей зависит выход клеточных структур с высоким содержанием белка (хлоропласты, митохондрии и др.) в гомогенат. Прессованием он разделяется на «зеленый» сок и жом, состоящий из неразрешенных клеток и тканей. Белок жома, или остаточный белок, составляет около половины исходного белка, содержащегося в фитомассе, вследствие чего жом также представляет собой достаточно ценный корм, особенно для молодняка сельскохозяйственных животных. Кроме того, жом может быть подвергнут промывке раствором NaCl (5%) для дополнительного извлечения солерастворимых фракций белка.

Белок из «зеленого» сока выделяется термокоагуляцией при нагревании до 80°C или химической коагуляцией при подкислении уксусом или муравьиной кислотой до pH 3.5–4.0. Белый осадок в особых случаях отделяется центрифугированием, а затем подвергается сушке в щадящем режиме при температурах, не вызывающих жесткой денатурации, ведущей к снижению усвоения организмом животных [49].

Белок, получаемый без специальной очистки и с высоким содержанием хлорофилла, используют как кормовой концентрат, а при повторном осаждении супернатанта центрифугированием с большим ускорением получают более светлый концентрат, условно называемый пищевым белком. Показано, что содержание лизина в ходе экстракции повышается с 5% в белке исходного сырья до 9% в белках концентрата, что свидетельствует о перераспределении фракций в составе белка в пользу альбуминов и глобулинов. Оба концентрата со-

держат сопутствующие вещества, преимущественно клетчатку и пектин, а доля белка составляет 42% в кормовом и достигает 76% в пищевом концентрате.

Кроме того, установлено, что в ходе экстракции в белковых концентратах снижается содержание антипитательных веществ (сапонинов и полифенолов) относительно их количества в фитомассе на 49–51%, а доля – на 77–79%.

Таким образом, изменения, происходящие при получении белковых концентратов из фитомассы амаранта, следует рассматривать как положительные, поскольку улучшается фракционный и аминокислотный состав и снижается содержание антипитательных веществ, что увеличивает пищевую и кормовую ценность целевых концентратов.

Summary

I.A. Chernov, G.A. Gasimova, I.A. Degtyareva, Yu.A. Kulikov. High-lysine protein biosynthesis in *Amaranthus L.* plants. Composition, properties and technology of it isolation from amaranth phythomass.

In the state-of-the-art review, the results of experimental researches of features of biosynthesis, structure and properties of fibers amaranth are considered. The communication of their specificity with functioning of physiology-biochemical mechanisms and anatomico-morphological nuances of a structure subcell organoid and optical structure of the sheet device is shown. Dependence on integration of processes carbon and nitric metabolism, mutual stimulation of processes of ability to live amaranth and dyazotrophs is marked.

Литература

1. *Пурп Н.У.* Белки из листьев зеленых растений. – М.: Колос, 1980. – С. 192.
2. *Carlsson R.* Selection of Centrospermae and other species for production of leaf protein concentrate: Ph. D. Thesis, Univ. of Lund, Sweden, LUNBDS (NBFB 1004). – Lund, Sweden, 1975. – P. 1–8.
3. *Carlsson R.* Amaranth species and related species for leaf protein concentrate production // Proc. Amaranth conf. – 1977. – P. 83–99.
4. *Saunders R.M., Becker R.* *Amaranthus*: a potential food, and feed resource // Pomeranz Y. (ed). Advances in cereal science and technology. – St. Paul, MN: A.A.C.C., 1984. – V. 6. – P. 357–396.
5. *Лазаньи Я., Капочи И., Бене Ш. и др.* Оценка продукции биомассы и семян щирицы в засушливых районах большой Венгерской низменности // Междунар. с.-х. журн. – 1988. – Т. 5. – С. 60–64.
6. *Чернов И.А.* Амарант – физиолого-биохимические основы интродукции. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1992. – 87 с.
7. *Tchernov I.A.* The potential of *Amaranthus L.* and the problem of leaf protein // Green vegetation fractionation: Proc. of the Fifth Intern. Congress on Leaf Protein Research “LEAFPRO-96”. – Rostov-on-Don (Russia), 1996. – V. 3. – P. 44–50.
8. *Bressani R.* Composition and nutritional properties of *Amaranth* // Paredes-López O. (ed). Amaranth: Biology, Chemistry and Technology. – Boca Ratón, US: CRC Press Inc., 1994. – P. 185–205.
9. *Kigel J.* Development and ecophysiology of *Amaranth*s // Paredes-López O. (ed). Amaranth: Biology, Chemistry and Technology. – Boca Ratón, US: CRC Press Inc., 1994. – P. 39–73

10. Чернов И.А., Дегтярева И.А. Физиолого-биохимическая регуляция взаимодействия растений рода *Amaranthus L.* и diaзотрофов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2005. – Т. 147, кн. 1. – С. 131–140.
11. Дегтярева И.А., Яппаров А.Х., Чернов И.А. Специфика взаимодействия углеродного и азотного метаболизма у амаранта. – Казань: Изд-во Центра инновационных технологий, 2006. – 208 с.
12. Tchernov I.A., Kheeroug S.S., Vyshtakaliuk A.B. Nutritious value of amaranth vitaminous-herbaceous meal in a composition of formula feed for laying hens // Plant Proteins from European Crops. Food and Non-Food Applications: Posters of intern. conf. – Nantes (France), 1998. – P. 189–193.
13. Караев А.Х., Тменов И.Д. Амарант – богатый источник протеина и аминокислот. – Владикавказ, 1998. – 75 с.
14. Чернов И.А., Куликов Ю.А., Гасимова Г.А. Физиолого-биохимические и агроэкологические аспекты интродукции растений рода *Amaranthus L.* в Среднем Поволжье // Ботанические сады как центры сохранения биоразнообразия и рационального использования растительных ресурсов: Материалы Междунар. конф. – М., 2005. – С. 533–535.
15. Laetsch W.M. Chloroplast specialization in dicotyledons possessing the C₄-dicarboxylic acid pathway of photosynthetic CO₂ fixation // Amer. J. Bot. – 1968. – V. 55. – P. 875–883.
16. Laetsch W. Specialized chloroplast structure of plants exhibiting the dicarboxylic acid pathway of photosynthetic CO₂ fixation // Progress in Photosynthesis Res. – 1969. – V. 1. – P. 36–34.
17. Downton W.J.S., Bisalputra T., Tregunna E.B. The distribution and ultrastructure of chloroplasts in leaves differing in photosynthetic carbon metabolism. II. *Atriplex rosea* and *Atriplex hastata* (Chenopodiaceae) // Canad. J. Bot. – 1969. – No 47. – P. 915–919.
18. Магомедов И.М. Фотосинтез и метаболизм углерода у растений с циклом дикарбоновых кислот // Ботан. журн. – 1974. – Т. 59, № 1. – С. 123–138.
19. Максимов Н.А. Краткий курс физиологии растений. – М.: Сельхозгиз, 1958. – 560 с.
20. Лархер В. Экология растений. – М.: Мир, 1978. – 382 с.
21. Кадошникова И.Г., Чернов И.А., Прокофьев А.Б. и др. Оптимизация оптической структуры агрофитоценозов амаранта // Преобразование световой энергии в фотосинтезирующих системах и их моделях: Тез. докл. Всесоюз. конф. – Пушкино, 1989. – С. 158–159.
22. Muravjova A.S., Ivanova I.F., Arhipova N.S., Chernov I.A. Peculiarities of water transport by the cells of *Amaranthus cruentus* // Studia Biophysica. – 1990. – V. 136, No 2–3. – P. 221–222.
23. Murav'ova A.S., Tchernov I.A., Iljasov A. The role of *Amaranthus cruentus L.* stem in water storage // Amaranth as food, forage and medicinale culture: Abst. Of papers of intern. Symposium. – Olomouc-Nitra (Czechoslovakia), 1992. – P. 23.
24. Grubben G. Cultivation methods and growth analysis of vegetable amaranth // Proc. Amaranth Conf. – 1979. – P. 63–67.
25. Irving D.W., Betschart A.A., Saunders R.M. Morphological studies on *Amaranthus cruentus* // J. Food Sci. – 1981. – No 46. – P. 1170–1174
26. Эдвардс Дж., Уокер Д. Фотосинтез C₃- и C₄-растений: механизмы и регуляция. – М.: Мир, 1986. – 590 с.
27. Бери Д., Даунтон У. Зависимость фотосинтеза от факторов окружающей среды // Фотосинтез. – М.: Мир, 1987. – Т. 2. – 470 с.

28. Soriano-Santos J., Iwabuchi S., Fujimoto K. Partial characterization of albumin and globulin from *A. cruentus* seed // Primer Congr. Intern. Del Amaranto. Mexico, 1991. – P. 71.
29. Mendoza-Guzman V., Paredes-Lopez O., Mora-Escobedo R. Aislamiento de las proteínas de Amaranto por diferentes procedimientos de extraccion incluyendo sonicacion // Primer Congr. Intern. Del Amaranto. Mexico, 1991. – P. 97.
30. Segura-Nieto M., Barba de la Rosa A.P., Paredes-López O. Biochemistry of Amaranth proteins // Paredes-López O. (ed). Amaranth: Biology, Chemistry and Technology. – Boca Ratón, US: CRC Press Inc., 1994. – P. 75–106.
31. Любимов В.Ю., Тюрина Р.Р., Кадошиников С.И., Чернов И.А. Фотосинтетическая активность и продукционный процесс у некоторых видов семейства *Amaranthaceae* // Возделывание и использование амаранта в СССР: Материалы I Всесоюзн. науч. конф. – Казань, 1991. – С. 98–113.
32. Солодова Е.А., Гинс В.К., Кононков П.Ф. и др. Методы фракционирования амаранта // Материалы III Междунар. симпозиума. – Пушкино, 1999. – С. 157–159.
33. Кулаков А.А., Гасимова Г.А., Чернов И.А. Экологически чистая безотходная переработка фитомассы амаранта в белковые концентраты и сопутствующие продукты // Экологические проблемы и пути их решения в зоне Среднего Поволжья: Материалы Всерос. науч. конф. – Саранск, 1999. – С. 109–111.
34. Гасимова Г.А., Врачев А.Ф., Дегтярева И.А. Видовая специфика биосинтеза белков у представителей рода *Amaranthus L.* при интродукции их в природно-климатических условиях Среднего Поволжья // Актуальные вопросы экологической физиологии растений в XXI веке: Тез. докл. междунар. конф. – Сыктывкар, 2001. – С. 200.
35. Гасимова Г.А., Чернов И.А. Специфика влажного фракционирования фитомассы амаранта // Проблемы рационального использования растительных ресурсов: Материалы междунар. науч. конф. – Владикавказ, 2004. – С. 21–24.
36. Чернов И.А., Куликов Ю.А., Гасимова Г.А. Особенности белков амаранта: экстракция, свойства, инновационные технологии и продукты // Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. – М., 2005. – Вып. 12. – С. 70–81.
37. Джекобсон Дж. Эмбриология растений. – М.: Агропромиздат, 1990. – Т. 2. – 463 с.
38. Paredes-López O., Mora-Escobedo R. Isolation of amaranth proteins // Lebenson, Wiss-Technol. – 1988. – V. 21. – P. 59–61.
39. Schaefer S. Considerations and constraints to the marketing of Amaranth grain // Amaranth: Perspectives on Production Processing and Marketing: Proc. 4th Nat. Amaranth Symp., 23–25 Aug. 1990. – St. Paul, MN: Minnesota Extension Service, University of Minnesota, 1990. – P. 97–104.
40. Tina-Flores S.A. Fraccionamiento de las proteínas del grano de amaranto // Primer Cong. Intern. del Amaranto. – Mexico, 1991. – P. 96.
41. Bressani R. Effects of processing of the nutritional qualities and functional properties of amaranth // Amaranth: Perspectives on Production Processing and Marketing: Proc. 4th Nat. Amaranth Symp., 23–25 Aug. 1990. – St. Paul, MN: Minnesota Extension Service, University of Minnesota, 1990. – P. 151–162.
42. Ли Р.Дж. Ассимиляция аммиака и биосинтез аминокислот // Фотосинтез и биопродуктивность. – М.: Агропромиздат, 1989. – С. 286–309.
43. Чернов И.А., Куликов Ю.А., Гасимова Г.А. Особенности белков амаранта (*Amaranthus L.*) // Материалы III Рос. науч.-практ. конф. – М., 2005. – С. 70–71.

44. Пlemenkova C.Ф., Горбунова Р.Н., Чернов И.А. Получение белково-аминокислотных концентратов кормового и пищевого назначения из зеленой массы амаранта // Всесоюзн. конф. «Химия пищевых веществ». – Могилев, 1990. – С. 107–109.
45. Пlemenkova C.Ф., Горбунова Р.Н., Шафигуллина Л.Г. Получение белка растительного происхождения из амаранта и исследование его химического состава // Всесоюзн. конф. «Химическое превращение пищевых полимеров». – Светлогорск – Калининград, 1991. – С. 173–174.
46. Пlemenkova C.Ф., Горбунова Р.Н., Чертищева Е.С. Новые технологии переработки фитомассы амаранта // Всерос. конф. «Амарант: агроэкология, переработка, использование». – Казань, 1993. – С. 79–81.
47. Plemenkova S.F., Gorbunova R.N., Tchernov I.A. Wet fractionation of the green mass from *Amaranthus* to obtain the protein concentrates // Green vegetation Fractionation: Proc. of the Fifth Intern. Congr. on Leaf Protein Research “LEAFPRO-96”. – Rostov-on-Don (Russia), 1996. – V. 1. – P. 103–106.
48. Tchernov I.A., Plemenkova S.F., Kulakov A.A. Amaranthus as source of slightly extractive and highquality protein // Plant Proteins from European Crops. Food and Non-Food Applications: Posters of intern. conf. – Nantes (France), 1998. – P. 3–5.
49. Чернов И.А., Михеев П.В., Гасимова Г.А. Глубокая комплексная переработка фитомассы амаранта как основа получения широкого спектра продуктов // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: Тр. IV междунар. симп. – Пущино, 2001. – С. 121–123.

Поступила в редакцию
02.07.07

Чернов Игорь Анатольевич – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Ботанического сада Казанского государственного университета.

Гасимова Гульшат Азатовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Ботанического сада Казанского государственного университета.

Дегтярёва Ирина Александровна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Ботанического сада Казанского государственного университета.

Куликов Юрий Алексеевич – кандидат биологических наук, директор Ботанического сада Казанского государственного университета.