

Н.А. Шмалько, И.А. Чалова, Н.А. Моисеенко, Н.Л. Ромашко

## ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА АМАРАНТА

Работа посвящена исследованию микроструктуры и химического состава перспективных в пищевом отношении видов сырья – продуктов переработки зерна амаранта. В ходе экспериментальных исследований установлено, что наиболее ценным сырьем для хлебопекарного производства среди продуктов переработки зерна амаранта является амарантовая белковая полуобезжиренная мука.

Продукты переработки зерна амаранта, хлебопекарное производство, микроструктура, химический состав.

### Введение

В последние годы на мировом рынке появился новый источник сырья для пищевой промышленности – зерно амаранта и продукты его переработки, обладающие ценным химическим составом и безопасностью, высококой пищевой и биологической ценностью, содержащие широкий спектр физиологически функциональных пищевых ингредиентов, что определяет перспективы их использования в технологии пищевых производств [1].

С целью определения целесообразности применения продуктов переработки зерна амаранта в хлебопечении в сочетании с традиционной хлебопекарной мукой исследовали их микроструктуру и химический состав. Объектами исследования явились продукты размола зерна амаранта (хлопья нативные, крупка полуобезжиренная, крупка крахмалистая, отруби белковые полуобезжиренные) и различные виды сортовой амарантовой муки (цельносмолотая полножирная, белковая полуобезжиренная, нативная).

По данной технологии хлопья амаранта (выход 53–56 %), отделяемые при плющении зерна амаранта, измельчают для производства амарантовой нативной муки (выход 82–88 %). Оставшаяся фракция после плющения зерна амаранта (28–35 %) – крупка зародышевая нативная подвергается обезжириванию для получения амарантового масла, после чего применяется для помола в белковую полуобезжиренную муку (выход 75–82 %) и отделения фракции белковых полуобезжиренных отрубей (выход 18–25 %) [2].

### Объекты и методы исследований

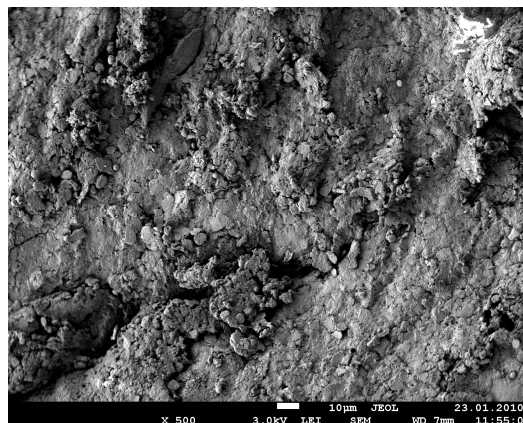
Микроструктуру продуктов переработки зерна амаранта (увеличение в 500 крат) исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 7500F в режиме детектирования вторичных (режим SEI) и отраженных (режим LEI) электронов, для чего каждую пробу зернопродукта наклеивали на прибородержатель микроскопа с помощью токопроводящей пасты и покрывали слоем металлической меди толщиной не более 100 нм с помощью термического вакуумного напыления.

Химический состав сырья определяли стандартными и общепринятыми методиками, при этом содержание витаминов и минеральных веществ исследовали методом капиллярного электрофореза на

приборе «Капель-103Р», за исключением фосфора и железа, анализируемых спектрометрическим методом с использованием индуктивно-связанной плазмы на приборе Optima 2100. Количество клетчатки оценивали методом высушивания до постоянной массы в СВЧ-минерализаторе. Аминокислотный состав исследовали методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-103Р», сущность которого заключается в разделении анионных форм N-фенилтиокарбамилпроизводных аминокислот под действием электрического поля вследствие их различной электрофоретической подвижности.

### Результаты и их обсуждение

При изучении микроструктуры продуктов зерна амаранта установлено, что амарантовые нативные хлопья представляют собой конгломерат частиц эндосперма в виде пластин с плотной монолитной многослойной структурой белково-крахмально-липидного комплекса, в который вмонтированы как отдельные нативные зерна крахмала, покрытые прикрепленным белком, так и зерна крахмала, поврежденные в ходе механической обработки (рис. 1). В клетках хлопьев имеется сравнительно мало углублений от выпавших зерен крахмала, воздушных по-



лостей и микротрещин наряду с присутствием большого количества оболочек.

Рис. 1. Амарантовая нативная крупка

Для частиц амарантовой зародышевой полуобезжиренной крупки характерна очень рыхлая

слоистая структура, состоящая из конгломератов белка и поврежденных крахмальных зерен с большим количеством воздушных пустот и микротрещин. Подобное строение частиц определяет высокую удельную поверхность белково-крахмального матрикса и, вероятно, его повышенную водопоглощающую способность и доступность действию экстрагентов или ферментов (рис. 2).

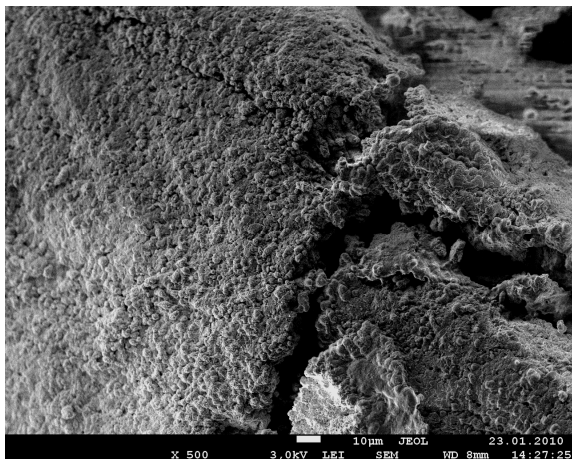


Рис. 2. Амарантовая зародышевая полуобезжиренная крупка

Амарантовые белковые полуобезжиренные отруби состоят из многоугольных ассоциатов, содержащих частицы белкового матрикса с поврежденными крахмальными зёрнами, со значительным количеством воздушных пустот и оболоченных частиц, обогащенных пищевыми волокнами (рис. 3). Очевидно, что строение частиц отрубей, имеющее большое сходство с частицами крупки, будет обуславливать и схожие состав и свойства. Для обоих видов зернопродуктов характерна разрушенная структура белково-крахмально-липидного комплекса за счет проведения соответствующей механической и экстракционной обработки сырья при плющении зерновки амаранта, получении амарантового масла и помоле белковой муки.

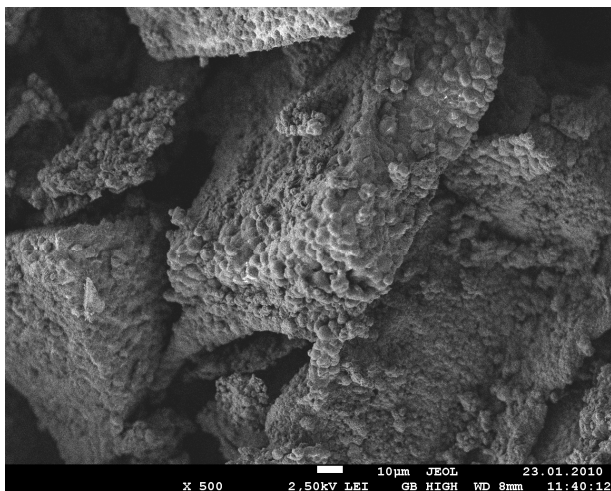


Рис. 3. Амарантовые белковые полуобезжиренные отруби

Микроструктура традиционной хлебопекарной муки – пшеничной первого сорта и ржаной обдирной значительно отличается от микроструктуры сортовой амарантовой муки: белковой, нативной и цельносмолотой. Для клеток пшеничной муки (рис. 4) характерно наличие рыхлой, частично разрушенной белковой матрицы, содержащей частицы промежуточного белка (цвикельпротеина) и друз – фрагментов клеток эндосперма зерна пшеницы, в которые «вмонтированы» по всей поверхности зерна крахмала шарообразной формы размером порядка от 3 до 60 мкм. Сцепление зерен крахмала осуществляется за счет наличия между ними прикрепленного белка. В белковой матрице имеются углубления от выпавших зерен крахмала, воздушные полости, микротрещины, частицы эндосперма с оболочкой.

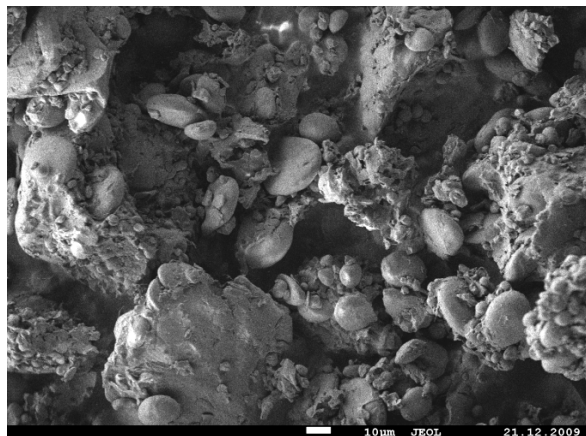


Рис. 4. Мука пшеничная первого сорта

Ржаная обдирная мука (рис. 5) отличается от пшеничной муки большим содержанием фракций мелкозернистого крахмала размером не более 20 мкм, прикрепленных к тонкослойной рыхлой белковой матрице с включением пластинок промежуточного белка и клеток эндосперма с оболочкой.

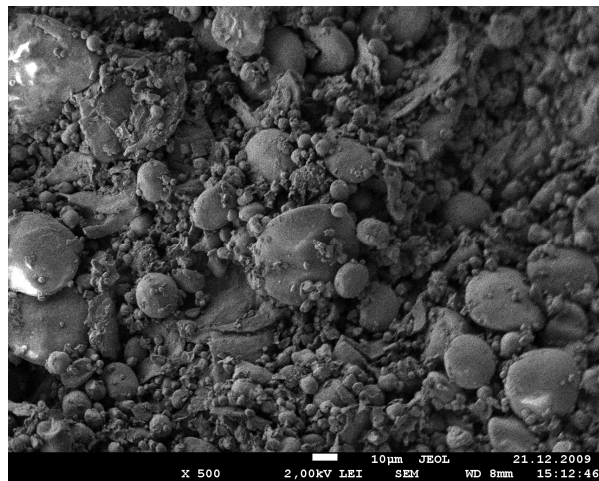


Рис. 5. Мука ржаная обдирная



Микроструктура клеток сортовой амарантовой муки всех видов отличается от традиционной пшеничной или ржаной муки наличием сложных многоугольных ассоциатов, соединенных в плотную структуру, и мелкозернистого крахмала. Наиболее компактное расположение частиц промежуточного белка характерно для белковой муки, формируемой из частиц перисперма зерна амаранта, отчетливо различается и волокнистая структура прикрепленно-белка амаранта (рис. 6).

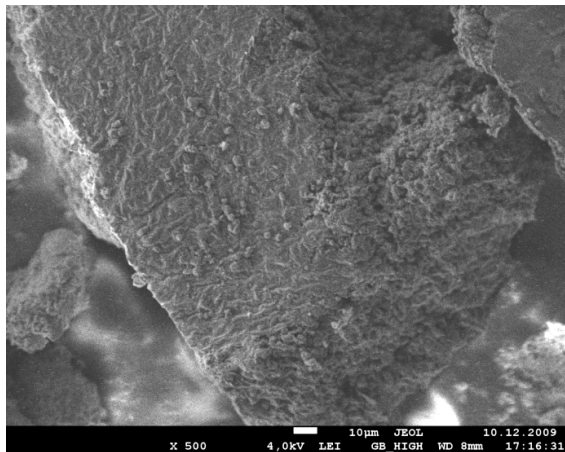


Рис. 6. Амарантовая белковая полуобезжиренная мука

Для амарантовой нативной муки, преимущественно состоящей из крахмалистых гранул эндосперма зерна амаранта, характерна очень рыхлая структура с большим количеством пустот и трещин, обуславливающая ее возможную высокую водопоглотительную способность (рис. 7). Цельносмолотая амарантовая мука (рис. 8) обладает промежуточной по крупности ассоциатов и степени рыхлости структурой, включающей в отличие от других видов амарантовой муки большее количество фрагментов частиц оболочек зерна. Белковая матрица клеток муки амаранта прерывистая, крахмальные зерна размером порядка 0,1–0,3 мкм имеют правильную шарообразную форму и покрыты тонким слоем прикрепленно-волокнистого по структуре белка. Отдельные зерна крахмала соединены между собой отростками белковой природы в различных направлениях в объеме, оставляя часть клетки для воздуха и тем самым формируя рыхлую структуру.

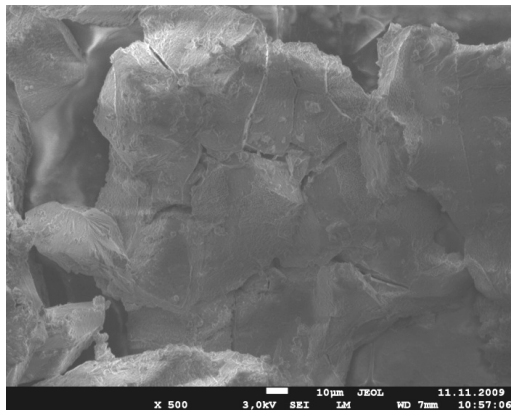


Рис. 7. Амарантовая нативная мука

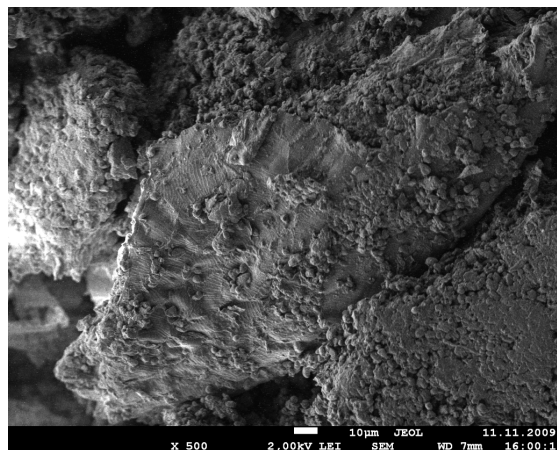


Рис. 8. Амарантовая цельносмолотая мука

Очевидно, что характерные особенности микроструктуры исследуемых продуктов переработки зерна амаранта обусловлены как составом и анатомическим строением исходного зерна, так и способами их получения. Так, например, большинство исследований по определению целесообразности использования амарантовой муки в хлебопечении было проведено на примере сортовой цельносмолотой муки, получаемой путем шлифования зерновок амаранта на абразивных жерновах-поставках либо на дисковых мельницах с обязательным предварительным охлаждением зерновой массы. Наиболее современный и эффективный способ помола зерна амаранта в муку осуществляется путем последовательного поэтапного воздействия на зерновку сжатием и сдвигом с целью разрыва оболочек и нарушения связи между зародышем и эндоспермом [2], что позволяет получить различные виды сортовой амарантовой муки (цельносмолотой, нативной, белковой) с заданным химическим составом.

Анализ химического состава продуктов помола зерна амаранта (табл. 1) показывает, что наибольшее количество белка характерно для зародышевой крупки и отрубей, которого в 1,4 и 2,6 раза выше, чем в пшеничных отрубях, что обусловлено содержанием в них анатомических частей области зародыша и эндосперма, и, напротив, хлопья и крахмалистая крупка, формируемые в основном из крахмалистой части (перисперма) зерна амаранта, содержат меньше белковых веществ.

Максимальное количество липидов среди объектов исследования содержится в амарантовой зародышевой крупке, формируемой из частиц зародыша зерна амаранта, где локализуются липидные клетки зерновки амаранта: в 1,9–2,8 раза больше, чем в пшеничных и амарантовых отрубях, в 2,2–5,7 раза, чем в крахмалистых хлопьях и крупке, которые, в свою очередь, превосходят остальные виды сырья по содержанию крахмала в среднем в 2,5–3,5 раза. Богатым источником пищевых волокон, витаминов и минеральных веществ являются амарантовые белковые отруби, которые по большинству компонентов превосходят такой традиционный обогатитель, как пшеничные отруби, за исключением содержания токоферола, который удаляется из сырья при получении амарантового масла.

Химический состав продуктов помола зерна амаранта

Наименование компонентов	Отруби пшеничные [3]	Отруби амарантовые белковые [2]	Хлопья амарантовые нативные [2]	Крупка амарантовая зародышевая [2]	Крупка амарантовая крахмалистая [4]
Влага, %	14,4	14,5	14,5	14,0	14,0
Белки, %	15,1	21,7	6,6	38,8	8,5
Липиды, %	3,8	5,8	1,9	10,8	5,0
Крахмал и декстрины, %	23,5	17,8	70,4	17,0	50,5
Моно- и дисахариды, %	0	0	2,8	0	2,5
Пищевые волокна, %, в том числе:	38,3	33,0	2,6	14,2	14,5
клетчатка	10,0	20,3	2,6	7,0	3,0
Зола, %	4,9	7,1	1,2	5,2	2,0
Минеральные вещества, мг на 100 г					
Натрий	8	212	74	113	86
Калий	1260	918	216	765	304
Кальций	150	559	131	477	187
Магний	448	393	106	274	114
Фосфор	950	990	364	870	409
Железо	14	130	36	84	19
Витамины, мг на 100 г					
Тиамин	0,75	9,67	3,54	8,54	1,18
Рибофлавин	0,26	4,50	1,45	5,91	0,73
Ниацин	10,50	–	–	–	12,2
Пиридоксин	0,97	2,50	1,90	3,20	–
Токоферол	6,80	2,20	2,80	2,20	–
Энергетическая ценность, ккал	191	210	336	325	291

Установлено, что для различных видов сортовой амарантовой муки (табл. 2), особенно белковой, характерно содержание белка в 2–4 раза выше, чем в хлебопекарной муке. Исключением является амарантовая нативная мука, в которой содержится минимальное количество белка среди изучаемых видов сырья. Наибольшим количеством липидов обладает амарантовая цельнозерновая мука, в которой их содержится в 3,6–8,9 раза выше, чем в других видах сырья, что обусловлено переходом липидного комплекса нативного зерна при помоле в муку. Амарантовая нативная мука, формируемая в основном из частиц крахмалистого перисперма, отличается большим (в 1,1–1,2 раза) содержанием крахмала, чем в хлебопекарной муке. В сравнении с хлебопекарной мукой во всех видах амарантовой муки содержится большее количество моно- и дисахаридов, клетчатки и минеральных веществ. Наибольшей минеральной и витаминной ценностью отличается амарантовая белковая мука, формируемая из анатомических частиц зародыша зерна амаранта.

Также в амарантовой муке идентифицированы аскорбиновая и оротовая кислоты. Биологическая роль аскорбиновой кислоты – витамина С ((2R)-2-[(1S)-1,2-дигидроксиэтил]-4,5-дигидроксифуран-3-он) заключается в формировании соединительной и костной ткани (образование коллагена), выполнении функций восстановителя (восстановление убинона, токоферола) и кофермента некоторых метаболических процессов (синтез серотонина из трип-

тофана, катехоламинов, кортикостероидов). Аскорбиновая кислота участвует в превращении холестерина в желчные кислоты, необходима для детоксикации в гепатоцитах при участии цитохрома P450, нейтрализует супероксид-анион радикал до перекиси водорода, как антиоксидант эффективно защищает липопротеины от окисления. Оротовая кислота (4-карбоксихиацил, 2,6-диоксипиримидин-4-карбоновая кислота) участвует в биосинтезе пиримидиновых нуклеотидов – уридинмонофосфата и цитидинмонофосфата, белковом обмене, а также стимулирует рост клеток.

Анализ аминокислотного состава объектов исследования показал, что продукты переработки зерна амаранта отличаются достаточно высокой биологической ценностью и сбалансированностью белков (табл. 3). По индексу незаменимых аминокислот среди продуктов помола зерна амаранта лидируют амарантовые нативные хлопья, содержащие наибольшее количество незаменимых аминокислот к массе белка. Для всех продуктов помола амаранта характерна примерно одинаковая сбалансированность состава незаменимых аминокислот, а показатель «сопоставимой избыточности» в большей степени стремится к нулю в амарантовой зародышевой крупке, так как в ней содержится наибольшее количество незаменимых аминокислот.

Химический состав хлебопекарной и амарантовой муки (Н.А. Шмалько, И.А. Чалова, 2008)

Наименование компонентов	Мука пшеничная хлебопекарная [3]		Мука ржаная обдирная [3]	Мука амарантовая сортовая			
	высшего сорта	первого сорта		цельносмолотая [4]		белковая полуобезжиренная [2]	нативная [2]
				высшего сорта	первого сорта		
Влага, %	14,0	14,0	14,0	13,6	11,0	12,1	12,4
Белки, %	10,3	10,6	8,9	20,3	19,1	41,4	6,8
Липиды, %	1,1	1,3	1,7	8,9	8,0	2,7	1,7
Крахмал и декстрины, %	68,7	67,1	59,3	45,0	48,5	32,1	72,5
Моно- и дисахариды, %	0,2	0,5	0,9	2,5	2,9	3,8	3,2
Клетчатка, %	0,1	0,2	1,2	6,0	6,6	3,4	2,5
Зола, %	0,5	0,7	1,2	3,6	3,8	4,3	0,8
Минеральные вещества, мг на 100 г							
Натрий	3	4	1	34	25	95	67
Калий	122	176	200	509	431	738	146
Кальций	18	24	19	180	179	462	85
Магний	16	44	25	264	229	253	74
Фосфор	86	115	129	772	620	848	290
Железо	1,2	2,1	2,9	9,4	13,1	76	22
Витамины, мг на 100 г							
Тиамин	0,17	0,25	0,25	0,21	0,18	8,34	3,41
Рибофлавин	0,06	0,08	0,08	0,05	0,06	5,91	1,47
Ниацин	1,20	2,20	2,20	1,00	1,10	–	–
β-каротин	–	Сл.	0,005	0,50	0,45	–	–
Пиридоксин	0,17	0,22	0,25	–	–	3,2	2,1
Токоферол	2,57	3,05	3,66	–	–	6,46	1,02
Органические кислоты, мг на 100 г							
Аскорбиновая	–	–	–	6,0	5,0	–	–
Оротовая	–	–	–	4,2	3,0	–	–
Энергетическая ценность, ккал	334	331	304	369	363	343	360

Таблица 3

Биологическая ценность и сбалансированность белков продуктов помола зерна амаранта (Н.А. Шмалько, И.А. Чалова, 2008)

Наименование компонентов	Зерно амаранта	Отруби амарантовые белковые	Крупка амарантовая зародышевая	Хлопья амарантовые нативные
Аминокислотный скор (АС), %				
Валин	44	50	51	66
Изолейцин	100	93	110	136
Лейцин	50	50	53	67
Лизин	56	73	75	82
Метионин + цистин	106	94	90	70
Треонин	83	123	105	103
Триптофан	60	90	90	144
Фенилаланин + тирозин	63	68	79	91
АС <sub>min</sub> , %	44	50	51	66
КРАС, %	26,3	30,1	30,6	37,4
БЦ, %	73,7	69,9	69,4	62,6
ИНАК, ед.	0,82	0,88	0,89	1,04
U, дол. ед.	0,36	0,33	0,34	0,43
σ, г/100 г белка-эталона (зрелое женское молоко)	8,77	8,80	4,40	5,56

В хлебопекарной пшеничной муке главной лимитирующей аминокислотой является лизин, аминокислотный скор которой не превышает 50 % (табл. 4), что снижает биологическую ценность белка. При этом необходимо учитывать тот факт, что при термической обработке, например, выпечке

хлеба, лизин способен вступать своей свободной ε-аминогруппой в реакцию меланоидинообразования, что снижает еще в большей степени его аминокислотный скор. Для белка амарантовой цельносмолотой муки характерен дефицит в метионине и цистине по аналогии с продуктами животного проис-

хождения (мясо, молоко), белковой муки – в лейцине, нативной муки – в валине. Наибольший показатель биологической ценности белков объектов исследования, находящийся в линейной зависимости от коэффициента различия аминокислотного сора, наблюдается в амарантовой нативной муке вследст-

вие минимальной разности аминокислотных скоров незаменимых аминокислот и сора первой лимитирующей аминокислоты, в остальных видах амарантовой муки значения данного показателя примерно одинаковы с показателем для хлебопекарной муки.

Таблица 4

Биологическая ценность и сбалансированность белков хлебопекарной и амарантовой муки  
(Н.А. Шмалько, И.А. Чалова, 2008)

Наименование аминокислоты	Мука пшеничная хлебопекарная		Мука ржаная обдирная	Мука амарантовая			
	высшего сорта	первого сорта		цельнозерновая		белковая полуобезжиренная	сортовая нативная
				высшего сорта	первого сорта		
Аминокислотный скор (АС), %							
Валин	76	96	114	70	74	102	80
Изолейцин	105	125	108	90	90	100	100
Лейцин	119	119	93	77	77	79	87
Лизин	44	50	62	173	124	162	129
Метионин + цистин	83	109	89	63	66	106	114
Треонин	65	78	93	228	250	115	83
Триптофан	100	110	120	64	80	260	210
Фенилаланин + тирозин	122	138	142	162	137	135	125
АС <sub>мин</sub> , %	44	50	62	63	66	79	80
КРАС, %	45,3	53,1	40,6	52,9	46,3	53,4	36,0
БЦ, %	54,7	46,9	59,4	47,1	53,7	46,6	64,0
ИНАК, ед.	0,92	0,99	1,00	1,01	1,01	1,11	1,05
U, дол. ед.	0,35	0,42	0,44	0,41	0,42	0,44	0,41
σ, г/100 г белка-эталоны (зрелое женское молоко)	28,1	28,4	12,9	25,0	14,5	8,0	1,8

По значению расчетного индекса незаменимых аминокислот среди объектов исследования лидирует амарантовая белковая мука, содержащая большее количество незаменимых аминокислот. Кроме того, для всех объектов исследования характерна примерно одинаковая сбалансированность состава незаменимых аминокислот, а показатель «сопоставимой избыточности» в большей степени стремится к нулю в амарантовой нативной муке, что совпадает с высоким расчетным показателем ее биологической ценности.

С учетом совокупности исследованных показателей среди продуктов переработки зерна амаранта наиболее приемлемым сырьем для целей хлебопечения является амарантовая белковая полуобезжиренная мука, обладающая специфической структурой и ценным химическим составом, предопределяющим ее позитивное влияние на биотехнологические свойства полуфабрикатов и качество готовой продукции.

#### Список литературы

1. Шмалько, Н.А. «Бессмертный» амарант / Н.А. Шмалько, Ю.Ф. Росляков // Пищевые ингредиенты. Сырье и добавки. – 2004. – № 1. – С. 71–73.
2. Смирнов, С.О. Разработка технологии разделения зерна амаранта на анатомические части и получения из них нативных продуктов: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01 – технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства. – М., 2006. – 215 с.
3. Химический состав пищевых продуктов: справочные таблицы содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов, органических кислот и углеводов / под ред. М.Ф. Нестерова, И.М. Скурихина. – М.: Пищ. пром-сть, 1979. – 248 с.
4. Шмалько, Н.А. Разработка технологий хлебобулочных изделий функционального назначения с использованием продуктов переработки семян амаранта: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01: защищена 26.05.2005: утв. 07.10.05 / Шмалько Наталья Анатольевна. – Краснодар, 2005. – 215 с.

ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет»,  
350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2.  
Тел./факс: (861) 274-11-64  
e-mail: adm@kgtu.kuban.ru

**SUMMARY**

**N.A. Shmalko, I.A. Chalova, N.A. Moiseenko, N.L. Romashko**

**Microstructure features and chemical composition of amaranth grain processing food products**

The work is devoted to the study of microstructure and chemical composition of amaranth grain processing products as a promising raw material for food processing. The pilot studies have shown that the most valuable raw material for breadmaking among the products of amaranth grain processing is amaranth protein fortified low-fat flour.

Amaranth grain processing food products, breadmaking, microstructure, chemical composition.

Kuban State University of Technology  
2, Moskovskaya Street, Krasnodar, 350072, Russia  
Phone/Fax: (861) 274-11-64  
e-mail: adm@kgtu.kuban.ru

