

## МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БИОДОСТУПНОСТИ В СОСТАВЕ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

А.В. Паймулина, И.Ю. Потороко, Н.В. Науменко, Е.Е. Науменко

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Разработка пищевых продуктов, обогащенных биологически активными веществами и оказывающих максимальный положительный эффект для здоровья, сопряжена с рядом проблем. Зачастую созданная многокомпонентная система пищевого продукта не обладает заявленными свойствами, что связано с низкой доступностью пищевых ингредиентов и отсутствием возможности их полноценного встраивания в матрицу пищевого продукта. В связи с чем возникает необходимость определения технологических операций, направленных на сохранение или повышение биологической доступности пищевых ингредиентов направленного действия. Целью настоящего исследования стало изучение возможности применения процесса микроструктурирования на основе низкочастотного ультразвукового воздействия (мощность – 240 Вт/л, время экспозиции – 20 минут) для минимизации ограничительных факторов при сохранении биологической активности пищевых ингредиентов в составе биологически активных добавок, экстрагированных из бурых водорослей, в частности высокосульфатированного гетерополисахарида фукоидана. Данный подход является перспективным направлением для пищевой промышленности при реализации технологий получения продуктов питания направленного действия, что обуславливает актуальность проведенных исследований. В результате проведенных исследований доказано, что процесс микроструктурирования оказывает выраженное положительное воздействие на структуру и морфологию частиц биологически активных добавок бурых водорослей. Так, размеры частиц в среднем снижаются в 30–40 раз, а суммарное значение показателя антиоксидантной активности увеличивается в среднем на 3,8 %. Процесс микроструктурирования на основе низкочастотного ультразвукового воздействия пищевых ингредиентов, содержащих биологически активные вещества бурых водорослей, косвенно способствует увеличению их биодоступности, что проявляется в количественном приросте простейших *Paramecium caudatum* на 29 %.

**Ключевые слова:** низкочастотное ультразвуковое воздействие, микроструктурирование, пищевые системы, биологически активные вещества, бурые водоросли, гетерополисахарид фукоидан.

### Введение

Исследования последних лет в области пищевых систем ориентированы на формирование нового понятийного аппарата и доказательной базы влияния отдельных нутриентов на общую пищевую ценность продукта питания. Как правило, исследователи пищевых продуктов рассматривают их как целостную сложную компонентную систему, в которой под влиянием технологических процессов происходят преобразования, не всегда обеспечивающие положительный эффект для полноценности содержащихся в системе веществ. Известная теория сбалансированного питания, разработанная академиком А.А. Покровским, и адекватного питания, принадлежащая академику А.М. Уголеву, в настоящее

время находятся на новом периоде развития и предполагают разработку пищевых продуктов, оказывающих максимальный профилактический эффект для здоровья человека [10, 12, 13].

Обогащение пищевой матрицы растительными биологически активными веществами (БАВ), извлекаемыми из различных видов сырья, имеет определенную ценность с точки зрения получения продуктов питания направленного действия. Как правило, такие БАВ позволяют решать вопросы повышения иммунитета и профилактики неинфекционных заболеваний, что является важным для населения, проживающего в неблагоприятных условиях окружающей среды, а также на экологически напряженных территориях.

Одними из наиболее перспективных БАВ являются, на наш взгляд, пищевые ингредиенты, экстрагированные из бурых водорослей. Некоторые из них, в частности водорастворимый полисахарид фукоидан, соли альгиновых кислот, а также йод в органической форме наиболее привлекательны, так как обладают целым комплексом доказанных биологически активных свойств. Использование данных БАВ в технологии продуктов питания позволяет нивелировать недостатки исходного сырья и получить систему пищевого продукта, обладающую выраженными адаптогенными свойствами [17, 18]. В настоящее время на потребительском рынке предлагаются различные биологически активные добавки (БАД) на основе экстрактов бурых водорослей, в составе которых основным действующим компонентом, преобладающим по количеству, является фукоидан.

Фукоидан – высокосульфатированный гептополисахарид, где основным моносахаридным остатком выступает L-фукоза, он обладает целым комплексом доказанных биологически активных свойств. Однако, являясь полисахаридом, в нативной форме фукоидан имеет высокий молекулярный вес, что выступает ограничением его применения в технологии некоторых пищевых систем, снижающим эффективность его действия. В этой связи определение способа снижения молекулярной массы при сохранении его биологической активности является актуальным [1–7, 16].

Весьма перспективным в этом направлении является применение низкочастотного ультразвукового воздействия (НУЗВ). Данный метод основан на способности высокоинтенсивных колебаний ультразвуковой частоты разрушать молекулярные и атомные структуры за счет формирования локальных разрывов жидких сред с образованием взрывающихся кавитационных пузырьков. Эффективность и безопасность применения НУЗВ в технологии пищевых производств доказана в работах известных зарубежных и отечественных ученых, таких как В.Н. Хмелев, О.Н. Красуля, М. Ashokkumar, G.J. Price, F. Grieser, а также ряда других исследователей [9, 13–15].

Применение данного способа воздействия целесообразно назвать методом микроструктурирования, так как в процессе НУЗВ происходит осцилляция кавитационных пузырьков, ударная волна которых при схлопывании приводит к изменениям микроструктуры и

морфологии частиц БАВ, при этом разрыв полимерных цепей в результате сонолиза не носит случайный характер, а осуществляется в середине молекулы.

**Целью** научной работы является исследование возможности применения метода НУЗВ для микроструктурирования БАД бурых водорослей при сохранении технологических и биологических свойств веществ в их составе.

### **Объекты и методы исследований**

Объектами исследования являлись следующие образцы коммерчески доступных биологически активных добавок (БАД) бурых водорослей:

– ПИ 1 – БАД «FUCOIDAN», содержащая фукоидан не менее 90 %, выделенный из бурых водорослей *Kjellmaniella crassifolia* (КНР);

– ПИ 2 – БАД «FUCOID POWER-U», содержащая фукоидан не менее 66 %, выделенный из бурых водорослей *Undaria pinnatifida* и *Laminaria japonica*, производитель НАЕWON BIOTECH, INC (Южная Корея);

– ПИ 3 – БАД «Фуколам-С-сырье» (ТУ 9284-067-02698170-2010, свидетельство ФБУЗ ФЦГиЭ Роспотребнадзора о государственной регистрации БАД № 77.99.23.3.У.739.1.06 от 30.01.2006), содержащая фукоидан бурых водорослей *Fucus evanescens* не менее 60 % и альгинат натрия (Россия).

Для микроструктурирования БАД применяли низкочастотное ультразвуковое воздействие (НУЗВ) в режиме, определенном в ходе рекогносцировочных исследований: мощность – 240 Вт/л, время экспозиции – 20 минут, при контроле температурного режима на уровне 50 °С.

Органолептические показатели БАД бурых водорослей определяли согласно требованиями Спецификации FDA и ТУ 9284-067-02698170-2010 «Фуколам-С-сырье».

Дисперсный состав порошков БАД определяли визуально и с применением метода лазерного динамического светорассеяния (Nanotracs Ultra, Microtracs Inc., США).

Определение суммарной антиоксидантной активности (АОА) осуществляли методом кулонометрического электрохимического титрования, с использованием универсального прецизионного кулонометра «Эксперт-006-антиоксиданты». Массовую долю йода в БАД бурых водорослей определяли согласно ГОСТ 26185-84.

Степень токсичности (оценку безопасности) проводили согласно ГОСТ 31674-2012 с помощью автоматизированного аппаратно-программного комплекса «БиоЛат» на тест-организмах – инфузориях вида *Paramecium Caudatum*.

Все измерения проводились в трехкратной параллельной повторности. Статистическая обработка результатов проводилась при вероятности 0,95.

### Результаты и их обсуждение

Результаты комплексного анализа БАД проводились согласно установленной расширенной номенклатуре показателей, достаточной для достижения поставленной цели работы. На каждом этапе экспериментальных исследований проводилась оценка применимости каждого из показателей как критерия достаточности для решения задач.

1. Результаты органолептической оценки (*Внешний вид и цвет* порошков БАД) позволили установить явные различия БАД бурых водорослей – порошки обладали разнородной дисперсностью, имели видимое наличие разноразмерных частиц, причем наиболее характерно прослеживалось у образца ПИ 3 «Фуколам-С-сырье» (табл. 1).

Визуальную неоднородность порошков дополнили и подтвердили данные исследования дисперсного состава БАД: ПИ 3 присутствуют частицы размером от  $(103 \pm 0,9)$  мкм до  $(32 \pm 0,4)$  мкм, в ПИ 1 и ПИ 2 – в среднем от  $(43 \pm 0,6)$  до  $(16 \pm 0,3)$  мкм.

Следовательно, визуальная оценка внешнего вида порошков является отправной точкой для использования метода лазерного динамического светорассеяния с целью обоснования необходимости проведения процесса микроструктурирования для пищевых ингредиентов.

2. Исследование растворимости БАД бурых водорослей показало, что образцы имели разную растворимость в воде (рис. 1), что безусловно связано с различием компонентов, входящих в их состав, а также обусловлены структурой и химической структурой.

В ходе наблюдений установлено, что лучше всего растворялся в воде образец ПИ 1, раствор имел соломенного цвета, прозрачный с легкой опалесценцией был устойчив во времени. Растворы образцов БАД ПИ 2 «FUCOID POWER-U» и ПИ 3 «Фуколам-С-сырье» ограничено растворялись, были практически непрозрачны, достаточно быстро приобретали вязкую консистенцию, по истечении 12 часов формировался уплотненный осадок.

Полученные результаты доказывают, что для обеспечения эффективного размещения БАД в пищевую систему и обеспечение клеточной доступности веществ необходимо проведение процесса диспергирования порошков, позволяющего микроструктурировать компоненты состава.

Важно при этом контролировать ряд показателей, в частности – размерный ряд частиц (доведение до наноуровня), биоактивные

Таблица 1  
Результаты исследования микроструктурных и морфологических характеристик образцов БАД бурых водорослей

Показатель	Образец		
	ПИ 1 БАД «FUCOIDAN», КНР	ПИ 2 БАД «FUCOID POWER-U», Юж. Корея	ПИ 3 БАД «Фуколам-С- сырье», Россия
Внешний вид и цвет порошков БАД			
Размер частиц, мкм	44,40 мкм – 50 % 16,02 мкм – 50 %	43,65 мкм – 48,2 % 15,82 мкм – 51,8 %	103,9 мкм – 22,9 % 32,14 мкм – 77,1 %

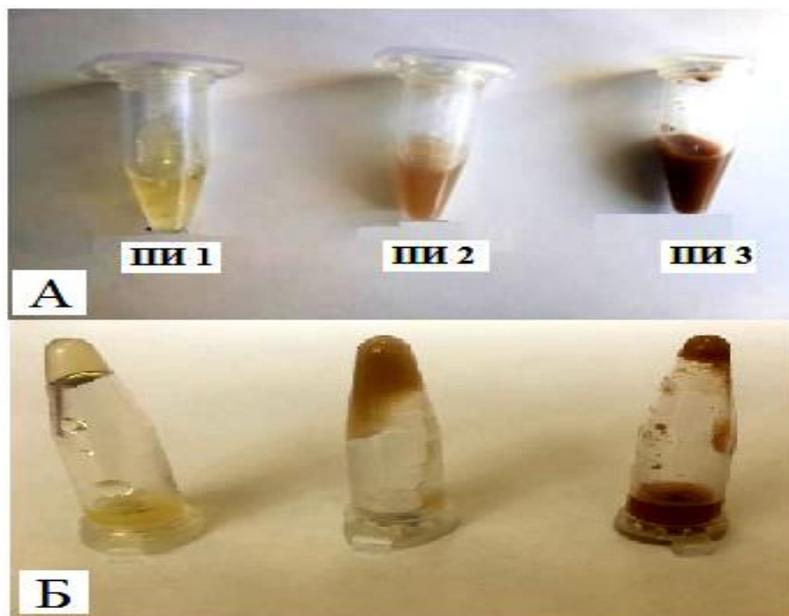


Рис. 1. Внешний вид растворов при разведении в соотношении ПИ : H<sub>2</sub>O как 1:5: А – состояние системы после разведения; Б – состояние системы через 12 часов после разведения

свойства (их стабильность), биодоступность (возможность активации биосистем).

3. Для изменения размера частиц был применен метод микроструктурирования на основе физического воздействия низкочастотного ультразвукового воздействия (НУЗВ) в режиме, определенном в ходе рекогносцировочных исследований: мощность 240 Вт/л, экспозиция 20 мин, температура 50 °С. В результате НУЗВ были получены образцы водных растворов микроструктурированных БАД бурых водорослей (ПИ<sub>микро</sub>1, ПИ<sub>микро</sub>2, ПИ<sub>микро</sub>3).

Полученные растворы за счет тонкой диспергированности частиц БАД однородны, не имеют осадка (рис. 2), с течением времени ПИ<sub>микро</sub> 2 «FUCOID POWER-U» и ПИ<sub>микро</sub> 3 «Фуколам-С-сырье» приобретали видимую вязкость без нарушения однородности системы раствора. Цвет становился более интенсивным, а запах – более выраженным, с приятными водорослевыми оттенками.

При анализе размера частиц БАД после микроструктурирования было установлено, что использование НУЗВ обеспечивает разрушение крупных конгломератов на более короткие элементы. Размеры частиц в среднем уменьшаются в 30–40 раз, размерный ряд смещается в диапазон наночастиц.

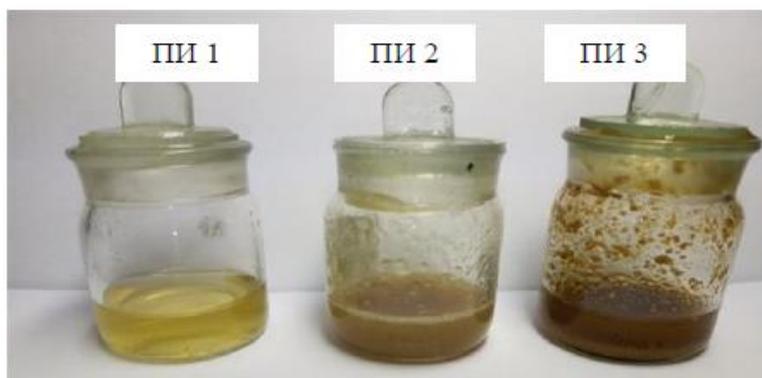
Изменение размера частиц БАД бурых водорослей можно объяснить формированием

в результате НУЗВ каверн, содержащих растворенные газы с высокой упругостью пара и воды, которые в таких полостях под действием тепловой или электрической активации подвергаются кавитационному расщеплению. Под действием НУЗВ кавитационные пузырьки испытывают циклы высокого и низкого давления, что приводит к их осцилляции [11, 14].

Коллапс кавитационных пузырьков создает ударную волну, достаточную для разрушения слабых химических связей и повышения до высоких скоростей частиц жидких систем, которые в результате столкновений могут изменять морфологию и реакционную способность [19]. Изменения размера частиц может быть обусловлено осцилляцией кавитационных пузырьков, ударная волна которых при схлопывании приводит к изменениям микроструктуры и морфологии частиц, т. е. кавитация способствует уменьшению размера частиц [8].

4. На следующем этапе исследований было проведено исследование биоактивных свойств БАД бурых водорослей.

Экспериментально установлено повышение антиоксидантной активности микроструктурированных БАД бурых водорослей, по отношению к исходным формам ингредиентов (рис. 3).



а



б

Рис. 2. Внешний вид растворов БАД бурых водорослей:  
а – исходные водные растворы; б – растворы ПИ, обработанные НУЗВ

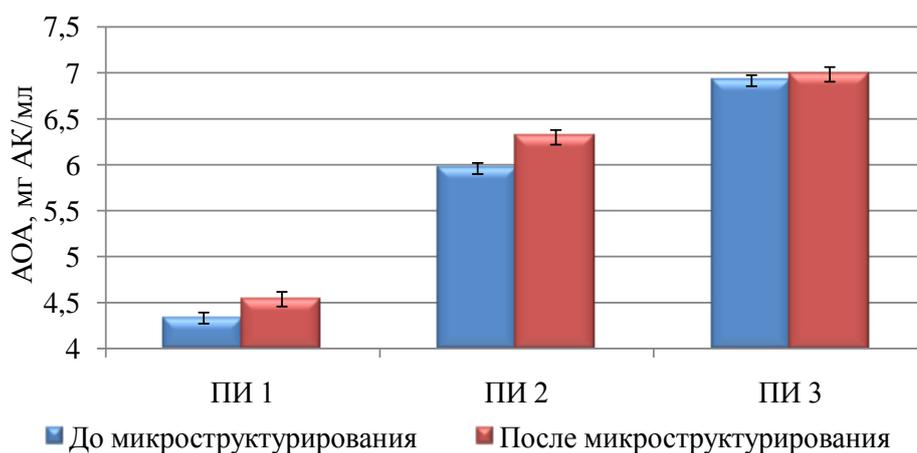


Рис. 3. Результаты исследования влияния НУЗВ на суммарную АОА  
БАД бурых водорослей, мг АК/мл

Суммарная антиоксидантная активность микроструктурированных БАД бурых водорослей повышается в среднем на  $(3,8 \pm 0,08)$  % для всех образцов. Несомненно, это имеет большую практическую значимость

при создании пищевых продуктов нового поколения.

Полученные данные, характеризующие массовую долю йода, доказывают, что образец ПИ 3 «Фуколам-С-сырье» является ком-

## Пищевые ингредиенты, сырье и материалы

плексным ингредиентом. В составе данного БАД содержится комплекс БАВ – альгинат натрия и фукоидан бурых водорослей семейства фукусовых *Fucus evanescens* и достаточно высокое количество йода (рис. 4).

Следует отметить, что процесс микроstructuring БАД бурых водорослей на основе НУЗВ (мощностью 240 Вт/л в течение 20 минут) практически не оказывает влияния на содержание йода (присутствуют колебания на уровне сотых значений) и качественно изменяют структурные характеристики компонентов, сохраняя высокие значения АОО. Можно предположить возможность положительного влияния НУЗВ микроstructuring на процессы обеспечения биодоступности компонентов БАД на клеточном уровне и требует проведения биотестирования.

5. С целью формирования доказательной

базы обеспечения биодоступности и отсутствия негативного влияния процесса микроstructuring пищевых ингредиентов на организм животных и человека, было проведено биотестирование на культуре простейших *Paramecium caudatum*.

Результаты доказали отсутствие токсичного действия на биокультуру, наблюдался количественный прирост простейших, что косвенно свидетельствует об увеличении доступности БАВ бурых водорослей для клеточных систем. Наибольший прирост был зафиксирован для ПИ<sub>микр3</sub> «Фуколам-С-сырье» – на 29 % (табл. 2).

Полученные в данном исследовании результаты в совокупности доказывают применимость НУЗВ микроstructuring для пищевых ингредиентов с целью эффективного их использования как обогащающих систем в

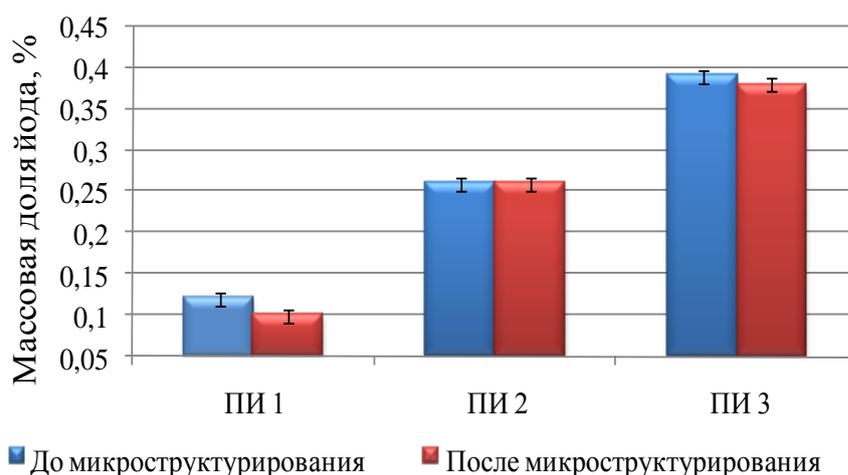


Рис. 4. Результаты исследования влияния НУЗВ на массовую долю йода в БАД бурых водорослей, %

Таблица 2  
Результаты исследования степени токсичности растворов БАД бурых водорослей до и после НУЗВ на простейших *Paramecium caudatum*

Образец	Усредненное количество инфузорий, шт.		Степень токсичности	Прирост, %
	Начало исследования	Конец исследования		
ПИ 1	159	184	нетоксичный	+15,7
ПИ <sub>микр1</sub>	280	346	нетоксичный	+23,6
ПИ 2	169	168	нетоксичный	-0,6
ПИ <sub>микр2</sub>	136	151	нетоксичный	+11,0
ПИ 3	108	109	нетоксичный	+0,9
ПИ <sub>микр3</sub>	169	218	нетоксичный	+29,0

технологиях пищевых продуктов. Авторами экспериментально подтверждена эффективность использования НУЗВ микроструктурирования БАД бурых водорослей для:

– обеспечения дисперсности системы (размеры частиц БАД в среднем уменьшаются в 30–40 раз);

– повышения АОА, которая возрастает в среднем на  $(3,8 \pm 0,08)$  %.

Данный технологический подход, безус-

ловно, может быть применен для разработки пищевых продуктов нового поколения, которые могут стать эффективным инструментом для профилактики неинфекционных заболеваний, в числе которых болезни, обусловленные нарушением углеводного обмена, сердечно-сосудистые и онкологические заболевания, возникающие на фоне неблагоприятных условий окружающей среды и неполноценного питания.

### Литература/References

1. Borazjani N.J., Tabarsa M., Guan S., Rezaei M. Improved immunomodulatory and antioxidant properties of unrefined fucoidans from *Sargassum angustifolium* by hydrolysis. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, vol. 54 (12), pp. 4016–4025. DOI: 10.1007/s13197-017-2867-2

2. Choi E.M., Kim A.J., Kim Y.O. Immunomodulating activity of arabinogalactan and fucoidan in vitro. *J. Med. Food*, 2005, vol. 8, no. 4, pp. 446–453. DOI: 10.1089/jmf.2005.8.446

3. Cumashi A., Ushakova N.A., Preobrazhenskaya M.E. A comparative study of the anti-inflammatory, anticoagulant, antiangiogenic and antiadhesive activities of nine different fucoidans from brown seaweeds. *Glycobiology*, 2007, vol. 17, pp. 541–552. DOI: 10.1093/glycob/cwm014

4. Denisova E. V., Suprunchuk V.E., Dronova A.A. Biopolymeric materials containing brown algae polysaccharides. *Entomology and Applied Science Letters*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 19–23. DOI: 10.24896/easl2017425

5. Etman S.M., Yosra S.R. Elnaggar, Ossama Y. Abdallah Fucoidan, a natural biopolymer in cancer combating: From edible algae to nanocarriertailoring. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 147 (15), pp. 799–808. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.191

6. Feldman S.C., Reynaldi S., Stortz C.A., Cerezo A.S., Damont E.B. Antiviral properties of fucoidan fractions from *Leathesia difformis*. *Phytomedicine*, 1999, vol. 6(5), pp. 335–340. DOI: 10.1016/S0944-7113(99)80055-5

7. Fletcher H.R., Biller P., Ross A.B., Adams J.M.M. The seasonal variation of fucoidan within three species of brown macroalgae. *Algal. Res. Elsevier*, 2017, vol. 22, pp. 79–86. DOI: 10.1016/j.algal.2016.10.015

8. Kollath A., Brezhneva N., Skorb E.V., Andreeva D.V. Microbubbles trigger oscillation of crystal size in solids. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, vol. 19, no. 8, pp. 6286–6291. DOI: 10.1039/c6cp07456a

9. Krasulya O., Tsiurlnichenko L., Potorocho I., Bogush V., Novikova Z., Sergeev A., Kuznetsova T., Anandan S. The study of changes in raw meat salting using acoustically activated brine. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 50, pp. 224–229. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.09.024

10. Naumenko N.V., Paimulina A.V., Ruskina A.A., Khudyakov V.V. Effect of various raw ingredients on bread quality. *Agronomy Research*, 2017, vol. 15, no. S2, pp. 1375–1385.

11. Portenlänger G., Heusinger H. The influence of frequency on the mechanical and radical effects for the ultrasonic degradation of dextrans. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1997, vol. 4, no. 2, pp. 127–130. DOI: 10.1016/s1350-4177(97)00018-7

12. Potorocho I., Kalinina I., Botvinnikova V., Krasulya O., Fatkullin R., Bagale U., Sonawane S.H. Ultrasound effects based on simulation of milk processing properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 48, pp. 463–472. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.06.019

13. Potorocho I.U., Kalinina I.V., Naumenko N.V., Fatkullin R.I., Shaik S., Sonawane S.H., Ivanova D., Kiselova-Kaneva Y., Tolstykh O., Paymulina A.V. Possibilities of regulating antioxidant activity of medicinal plant extracts. *Human. Sport. Medicine*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 77–90. DOI: 10.14529/hsm170409

14. Price G.J., Ashokkumar M., Grieser F. Sonoluminescence quenching by organic acids in aqueous solution: pH and frequency effects. *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, vol. 126, no. 16, pp. 2755–2762. DOI: 10.1039/b201795d

15. Raso J., Pagan R., Condon S. Influence of temperature and pressure on the lethality of ultrasound. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, vol. 64, pp. 465–471.
16. Ryu M., Chung H. Fucoidan reduces oxidative stress by regulating the gene expression of HO-1 and SOD-1 through the Nrf2/ERK signaling pathway in HaCaT cells. *Molecular Medicine Reports*, 2016, vol. 14, pp. 3255–3260. DOI: 10.3892/mmr.2016.5623
17. Seng J.L., Wan M.W.A., Maskat M.Y., Mamot S., Ropien J., Mohd D.M. Isolation and antioxidant capacity of fucoidan from selected Malaysian seaweeds. *Food Hydrocoll*, 2014, vol. 42, pp. 280–288. DOI: /10.1016/j.foodhyd.2014.03.007
18. Song Yu., Wang Qiu., Wang Qin., He Yu., Ren D., Liu Sh., Wu L. Structural characterization and antitumor effects of fucoidans from brown algae *Kjellmaniella crassifolia* farmed in northern China. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, vol. 119, pp. 125–133. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.07.126
19. Suslik K.S., Fang M., Hyeon T., Mdeleleni M. Applications of sonochemistry to materials synthesis. *Sonochemistry and Sonoluminescence*, 1999, pp. 291–320. DOI: 10.1007/978-94-015-9215-4\_24

**Паймулина Анастасия Валерияновна**, магистрант кафедры пищевых и биотехнологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [aaaminaaa@mail.ru](mailto:aaaminaaa@mail.ru)

**Потороко Ирина Юрьевна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [potorokoiy@susu.ru](mailto:potorokoiy@susu.ru)

**Науменко Наталья Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [Naumenko\\_natalya@mail.ru](mailto:Naumenko_natalya@mail.ru)

**Науменко Екатерина Евгеньевна**, студент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [9193122375@mail.ru](mailto:9193122375@mail.ru)

*Поступила в редакцию 11 октября 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/food210102

## MICROSTRUCTURING FOOD INGREDIENTS TO ENSURE THEIR BIOAVAILABILITY IN THE COMPOSITION OF FOOD SYSTEMS

**A.V. Paymulina, I.Yu. Potoroko, N.V. Naumenko, E.E. Naumenko**

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The development of food products enriched with biologically active substances and providing the maximum positive effect on health is associated with a number of problems. Often, the created multicomponent system of a food product does not possess the declared properties, which is associated with the low availability of food ingredients and the lack of the possibility of their full incorporation into the food product matrix. In this connection, it becomes necessary to determine technological operations aimed at maintaining or increasing the bioavailability of food ingredients of targeted action. The purpose of this study was to study the possibility of using the microstructuring process based on low-frequency ultrasonic exposure (power – 240 W/l, exposure time – 20 minutes) to minimize limiting factors while maintaining the biological activity of food ingredients in the composition of biologically active additives extracted from brown algae in particular highly sulfated fucoidan heteropolysaccharide. This approach is a promising direction for the food industry in the implementation of technologies for obtaining food with targeted action, which determines the relevance of the research. As a result of the studies, it was proved that the process of microstructuring has a pronounced positive effect on the structure and morphology of the particles of biologically active additives of brown algae. The size of particles decreases on average by 30–40 times, and the total value of the indicator of antioxidant activity increases on

average by 3.8 %. The process of microstructuring based on low-frequency ultrasonic action of food ingredients containing biologically active substances of brown algae indirectly contributes to an increase in their bioavailability, which is manifested in the quantitative increase in the protozoa *Paramecium caudatum* by 29 %.

**Keywords:** low-frequency ultrasonic exposure, microstructuring, food systems, biologically active substances, brown algae, fucoidan heteropolysaccharide.

**Anastasia V. Paymulina**, student of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, aaaminaaa@mail.ru

**Irina Yu. Potoroko**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, irina\_potoroko@mail.ru

**Natalia V. Naumenko**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Naumenko\_natalya@mail.ru

**Ekaterina E. Naumenko**, Bachelor's Degree student at the Department of Information and Communications Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, 9193122375@mail.ru

*Received October 11, 2020*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Микроструктурирование пищевых ингредиентов для обеспечения их биодоступности в составе пищевых систем / А.В. Паймулина, И.Ю. Потороко, Н.В. Науменко, Е.Е. Науменко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2021. – Т. 9, № 1. – С. 15–23. DOI: 10.14529/food210102

#### FOR CITATION

Paymulina A.V., Potoroko I.Yu., Naumenko N.V., Naumenko E.E. Microstructuring Food Ingredients to Ensure their Bioavailability in the Composition of Food Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 15–23. (in Russ.) DOI: 10.14529/food210102

---