

БИОТЕХНОЛОГИИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Научная статья

УДК 661.12

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-68-01

EDN: BASXGM

**Влияние сонификации на фракционный состав, физико-химические свойства
и антиоксидантную активность функциональных гелей из фукусовых водорослей**

Татьяна Николаевна Пивненко¹, Юлия Михайловна Позднякова²,
Роман Владимирович Есипенко³

^{1, 2, 3} Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

¹ tnpivnenko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0330-489X>

² pozdnyakova.julia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9078-0850>

³ azt@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8263-6939>

Аннотация. Рассмотрено влияние сонификации функциональных гелеобразных продуктов, полученных из бурой водоросли фукуса исчезающего *Fucus evanescens*, на фракционный состав, физико-химические свойства и антиоксидантную активность. Показано значительное влияние ультразвука на реологические свойства гелей, содержащих фукоидан, связанные с изменением структуры полисахаридов и их комплексов и образование вязких клейстеров. Динамическая вязкость гелей увеличивалась от 65 до 207 раз в зависимости от мощности сонирования. Одновременно наблюдали рост прочности гелей и преобразование полностью эластичного материала в практически полностью вязкий. Перераспределение фукоидана между водорастворимой фракцией и полисахаридными гелями показало, что в водной фракции содержится около 3 % фукоидана по сухой массе, а сонирование гелей позволяет увеличить его содержание от 17 до 24 % от общей массы. Наиболее высокое значение антиоксидантной активности установлено для водорастворимой фракции, что соответствует переходу в нее полифенольных соединений. Обработка ультразвуком позволила повысить антиоксидантную активность гелей от 7 до 64 % при пересчете на сухую массу. Полученные гели соответствуют требованиям концепции природных пищевых волокон с антиоксидантными свойствами и могут быть использованы в пищевых технологиях.

Ключевые слова: фукус, фукоидан, ультразвук, антиоксидантная активность, реология

Для цитирования: Пивненко Т. Н., Позднякова Ю. М., Есипенко Р. В. Влияние сонификации на фракционный состав, физико-химические свойства и антиоксидантную активность функциональных гелей из фукусовых водорослей // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 68, № 2. С. 6–18.

BIOTECHNOLOGY OF FOOD AND BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

Original article

The influence of sonification on the fractional composition, physicochemical properties and antioxidant activity of functional fucus algae gels

Tatyana N. Pivnenko¹, Yulia M. Pozdnyakova², Roman V. Esipenko³

^{1, 2, 3} Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

¹ tnpivnenko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0330-489X>

² pozdnyakova.julia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9078-0850>

³ azt@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8263-6939>

Abstract. The effect of sonification of functional gel-like products obtained from the brown algae *Fucus evanescens* on the fractional composition, physico-chemical properties and antioxidant activity was considered. A significant effect of ultrasound on the rheological properties of gels containing fucocyan was shown associated with changes in the structure of polysaccharides and their complexes and the formation of viscous paste. The dynamic viscosity of the gels increased from 65 to 207 times depending on the sonation power. At the same time, an increase of the gels strength and the transformation from a completely elastic material into an almost completely viscous one were observed. The redistribution of fucoidan between the water-soluble fraction and polysaccharide gels showed that the aqueous fraction contains about 3 % fucoidan of dry weight, and the sonification of gels allows to increase its content from 17 to 24 % of the total mass. The highest value of antioxidant activity was established for the water-soluble fraction, which corresponds to the transition of polyphenolic compounds into it. Ultrasound treatment allowed increasing the antioxidant activity of the gels from 7 to 64 % in terms of dry weight. The resulting gels meet the requirements of the concept of natural dietary fibers with antioxidant properties and can be used in food technologies.

Keywords: fucus, fucoidan, ultrasound, antioxidant activity, rheology

For citation: Pivnenko T. N., Pozdnyakova Yu. M., Esipenko R. V. The influence of sonification on the fractional composition, physicochemical properties and antioxidant activity of functional fucus algae gels. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2024; 68(2):6–18. (in Russ.).

Введение

В настоящее время наблюдается рост числа научных исследований в области функционального питания и распространение этих знаний среди населения. Это, в свою очередь, приводит к увеличению потребительского спроса на подобные изделия. Уже выделены определенные категории функциональных ингредиентов, считающихся наиболее эффективными для поддержания физиологических функций организма, их стали называть «суперфудами». Морские водоросли занимают в этом списке одно из первых мест. Изучение химического состава водорослей показало наличие множества биологически активных компонентов разнонаправленного действия, в том числе пищевых волокон. Они могут быть растворимыми и нерастворимыми, образовывать комплексы с низкомолекулярными компонентами, что обеспечивает многообразие их биологических эффектов, а также возможностей применения в пищевом производстве [1, 2].

С недавнего времени в отдельную категорию стали выделять антиоксидантные пищевые волокна (АПВ). При этом антиоксидантная активность (АОА) может быть использована не

только для профилактики заболеваний, но и как важный технологический инструмент при производстве пищевой продукции. Показано их влияние на реологические свойства продуктов, а также увеличение сроков годности [3, 4].

Первоначально использовали измельченные цельные водоросли, в дальнейшем – выделенные и очищенные полисахариды. Наиболее известные из них альгинаты и каррагинаны. С недавнего времени все больший исследовательский интерес привлечен к фукоидану, сульфатированному полисахариду, основным мономером которого является фукоза. Известно также, что фукоидан образует прочные комплексы с веществами полифенольной природы. До сих пор ведутся дискуссии о том, какой из компонентов этих комплексов отвечает за его высокую АОА [5–8].

В научных работах обоснованы способы применения фукоидана для обогащения пищевых продуктов в виде измельченных водорослей или в виде очищенного препарата. Для усиления биологической активности фукоидана используют различные приемы [9]. Большой интерес вызывает использование ультразвука (УЗ) – сонификации. Сонификация влияет на степень полимеризации, разрушение комплексов с сопутствующими компонентами, а также на гелеобразующие свойства. УЗ-обработку используют при выделении фукоидана чаще всего при обработке непосредственно самих водорослей или для деструкции уже очищенного препарата [10–11]. В нашей работе предложено обрабатывать УЗ промежуточный продукт переработки фукуса, а именно гель, полученный после удаления водорастворимых компонентов и последовательной очистки. Установление рациональных параметров сонификации позволит регулировать не только АОА, но и реологические свойства сначала водорослевых гелей, а затем и готовых пищевых изделий с их использованием. Кроме того, полученные данные позволят внести некоторый вклад в дискуссию о компонентах – носителях АОА.

Целью представленной работы явилось изучение влияния сонификации функциональных гелей из фукусовых водорослей, предназначенных для использования в качестве пищевых структурообразователей, на их фракционный состав, физико-химические свойства и антиоксидантную активность.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служил тонкоизмельченный порошок фукуса исчезающего *Fucus evanescens*.

Для обработки фукуса использовали метод-прототип [12] и модифицированный нами способ с применением УЗ.

Согласно известному способу навеску порошка фукуса промывали в проточной воде при температуре окружающей среды для удаления механических загрязнений и избытка минеральных солей. Затем заливали дистиллированной водой в соотношении 1 : 10 (порошок : вода), экстрагировали в течение 4 ч при температуре 35 ± 5 °С. Экстракт отделяли фильтрованием. Осадок помещали в раствор 2 % HCl, при температуре 30 ± 2 °С выдерживали при перемешивании в течение 2 ч. Соотношение порошок : раствор кислоты – 1 : 10. Осадок отмывали в проточной воде 3–4 раза с настаиванием (20 мин) до pH 5,5–6,0; нагревали в 10 % растворе Na₂CO₃ при pH 8–9 в течение 2 ч при температуре 40 ± 2 °С. Соотношение порошок : раствор – 1 : 1. На этом этапе было получено 2 продукта – водный экстракт и гель.

Для обоснования способа микронизации полученного геля использовали обработку УЗ с помощью ультразвукового процессора Sonic Vibra Cell модели VCX 130 производства *Sonics & Materials, Inc.*, США. Экспериментально определяли параметры режима УЗ – мощность озвучивания и время обработки. Во избежание перегрева использовали охлаждающую рубашку для поддержания температуры не более 50 °С.

Для оценки дисперсного состава полученных гелей использовали микроскопирование с помощью микроскопа ЛОМО МикМед-5 при увеличении в 20 раз.

Определение содержания фукозы проводили спектрофотометрическим методом по цветной реакции с L-цистеином и серной кислотой. Оптическую плотность полученных растворов замеряли при 393 нм и 430 нм. Для расчета количества фукоидана полученное значение умножали на 2, учитывая условное содержания фукозы в фукоидане, равного 50 % [13].

Антиоксидантную активность в образцах измеряли по поглощению свободных радикалов с использованием 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила (ДФПГ) по модифицированному методу Qwele [14]. Степень обесцвечивания растворов ДФПГ при добавлении образцов определяли спектрофотометрически при 517 нм. В качестве положительного контроля использовали витамин Е (α -токоферола ацетат). Активность удаления свободных радикалов (ингибирования) ДФПГ, выраженную в процентах, рассчитывали по формуле

$$\text{Степень ингибирования ДФПГ} = [(A_0 - (A - A_э)/A_0) \times 100], \%,$$

где A_0 – оптическая плотность раствора ДФПГ без образца; A – оптическая плотность образца экстракта с ДФПГ; $A_э$ – оптическая плотность образца экстракта без ДФПГ.

Вязкость (МПа•с) определяли с помощью ротационного вискозиметра серии NDJ (Labaо, Китай) с использованием ротора № 3 при скорости вращения 60 об/мин.

Для определения реологических показателей использовали текстурометр Брукфильда TexturePro СТЗ, зонд для определения ТА18. Использование данного прибора позволяет измерять следующие показатели:

Прочность, способность продукта воспринимать нагрузку без разрушения и образования остаточной деформации.

Деформация твердости или пластическая деформация, соответствует величине расстояния, на котором начинается необратимая деформация.

Цикл восстановимой деформации или упругая деформация – высота поднятия продукта после снятия сжимающей силы.

Восстановимый рабочий цикл, mJ, соответствует работе, которую выполнил продукт против сжимающей силы после ее удаления, указывает внутреннюю силу связей в продукте.

Сила сцепления или адгезия, г, характеризует способность к прилипанию.

Адгезионная способность, mJ, соответствует прочности соединения двух тел из различных материалов.

Коэффициент упругости характеризует свойства продукта по восстановлению после деформации, при этом значение, равное 1, указывает на полностью эластичный материал, а значение 0 соответствует полностью вязкому материалу.

Для статистического анализа использовали прикладной пакет «Statistica 6». Выборочные параметры, приводимые в таблицах: средняя арифметическая (M), стандартное отклонение (σ), объем анализируемой подгруппы (n). Уровень доверительной вероятности 95 %.

Результаты и их обсуждение

В качестве исходного сырья был взят тонкоизмельченный порошок фукуса *F. evanescens*. Химический состав порошка представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав тонкоизмельченного порошка фукуса *F. evanescens*, %

Table 1

Chemical composition of finely ground fucus powder *F. evanescens*, %

Вода	Фукоидан	Альгинаты	Ламинаран	Азотсодержащие вещества	Маннит	Минеральные вещества
12,6±1,4	8,4±1,4	29±1,4	3,6±1,4	6±1,4	2±1,4	20±1,4

Как свидетельствуют данные о содержании основных компонентов, содержащихся в исходном сырье, оно может быть источником целого ряда биологически активных веществ. Однако основная задача, поставленная в нашем исследовании, требует использования веществ с максимальным антиоксидантным эффектом. Среди перечисленных в таблице к ним относится именно фукоидан. Второе необходимое условие – это получение продукта в виде геля, способного влиять на реологические свойства формованных пищевых изделий.

Для того чтобы совместить эти качества в одном продукте, был использован метод получения водорослевого геля, содержащего фукоидан. В качестве способа-прототипа было использовано изобретение А. В. Подкорытовой и соавторов [102], в котором предусмотрено получение серии водорастворимых соединений и гелеобразных продуктов из ламинарии и фукуса, содержащих биологически активные соединения. Два основных компонента полученных гелей – фукоидан и альгинат. Для увеличения доли фукоидана и его биологической доступности в гелеобразных продуктах мы предложили использовать обработку УЗ.

Первоначально рассматривали сенсорные и реологические характеристики полученных продуктов и влияние на них режима сонирования. Все образцы гелей были темно-коричневого цвета, различающиеся по вязкости и гомогенности. Образец без обработки УЗ имел неоднородную структуру и с течением времени расслаивался на две фазы. После УЗ-обработки образцы становились более густыми. С увеличением мощности обработки повышалась вязкость и однородность гелей, которые оставались стабильными в течение нескольких суток. Микроскопирование полученных гелей позволило получить следующую картину (рис. 1).

Изменение структуры компонентов бурых водорослей под действием УЗ определяется эффектом кавитации в водной среде, при котором образуются попеременные циклы сжатия и расширения пузырьков. Пузырьки схлопываются с достижением высоких температур (до 1500 °С) и давления (до 50 МПа). Другими факторами, вызывающими деформацию молекул, являются вибрация, образование ударных волн и радикалов из жидкости, в которой растворен материал (например, вода расщепляется на H^+ и OH^-) [10].

Наблюдаемые под микроскопом изменения дисперсности и размера частиц геля подтверждают значительное влияние мощности и времени сонирования на эти параметры. Необработанный гель образован конгломератами частиц разного размера неправильной формы. После сонирования наблюдается разрушение крупных конгломератов и образование значительно более однородной дисперсии. При увеличении времени обработки и мощности УЗ происходило нарастание указанных явлений. Повторное появление новых конгломератных структур в обработанных образцах может быть связано с осцилляционными колебаниями кавитационных пузырьков, при схлопывании которых происходили изменения микроструктуры частиц и их обратное связывание. Ранее было показано, что при УЗ-обработке происходило преобразование частиц в препаратах фукоидана от 8 мкм до 80–250 нм, т.е. их переход в нанометровый диапазон, что значительно усилило его биологическую активность [15].

Эффективность УЗ-обработки полимеров зависит от длины полимера, концентрации и типа растворителя, частоты и интенсивности. Как правило, УЗ-обработка разрушает полимерные цепи в центральной точке или местах, которые являются структурно самыми слабыми. Молекулы с высокой молекулярной массой и длинной цепью чаще разрываются в центре, чем более короткие. Линейные полимерные цепи легче поддаются сонолизу по сравнению с разветвленными [10, 15].

Инструментальное измерение динамической вязкости позволило получить результаты, которые хорошо соотносятся с визуальными наблюдениями и микроскопированием (табл. 2).

Полученные результаты показывают значительное влияние УЗ-обработки на вязкость гелей, содержащих фукоидан. Предположительно это связано с тем, что при подобной обработке наблюдается изменение структуры полисахаридов и их комплексов, разрыв водородных связей и гидратация макромолекул, что приводит к образованию вязких клейстеров [8, 16].

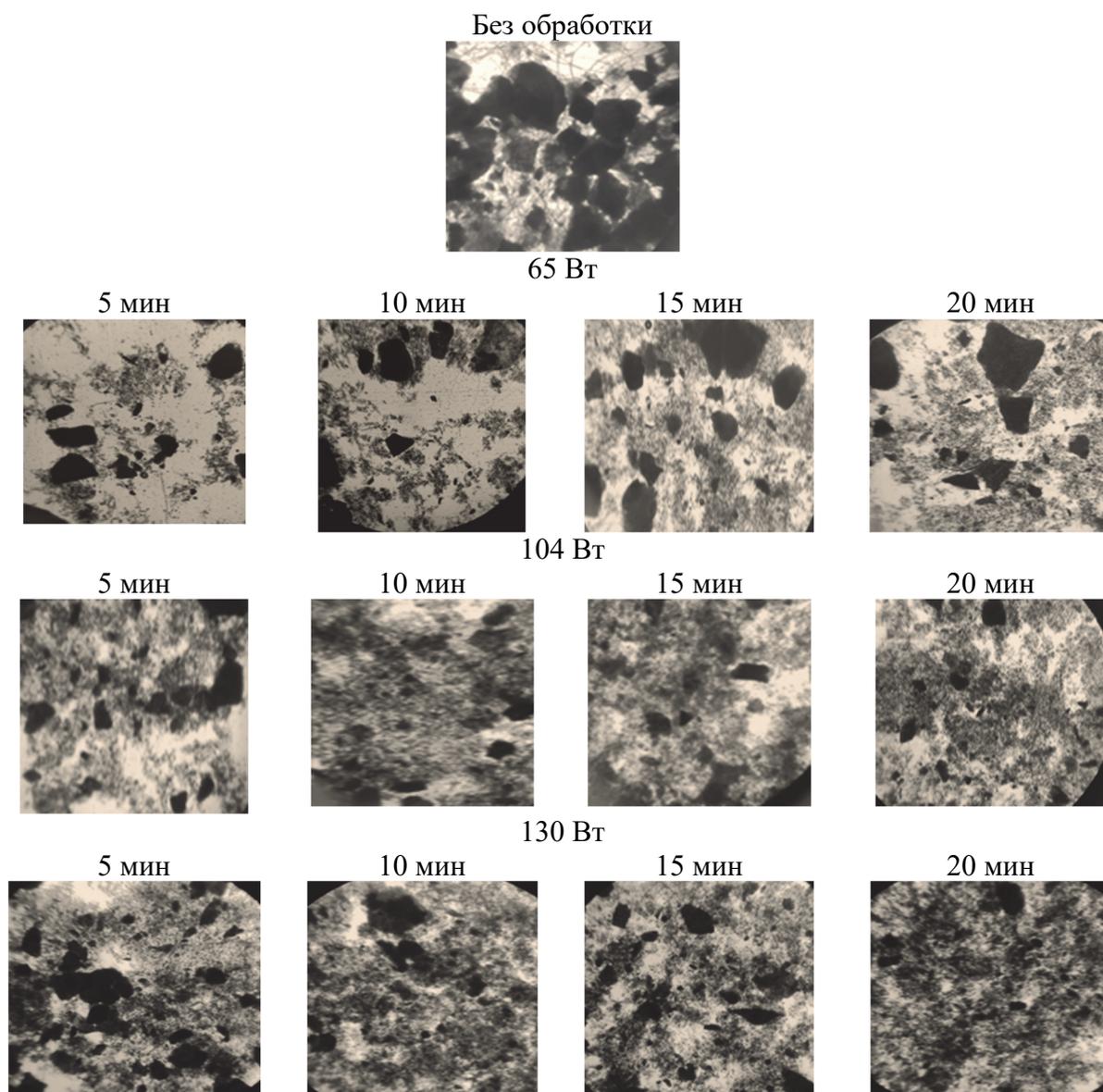


Рис. 1. Изменения дисперсного состава гелей фукоидана при различных режимах УЗ-обработки

Fig. 1. Changes in the dispersed composition of fucoidan gels under different modes of ultrasonic treatment

Таблица 2

**Влияние мощности УЗ-обработки (время 20 мин, частота 20 кГц)
на динамическую вязкость гелей из фукуса**

Table 2

**The effect of ultrasonic processing power (time 20 min, frequency 20 kHz)
on the dynamic viscosity of fucus gels**

Мощность, Вт	Вязкость, МПа·с
Без обработки	8,7
65	569,5
104	1574,4
130	1804,2

Увеличение вязкости после УЗ резко возрастает с увеличением мощности, через 20 мин обработки при 65 Вт она увеличивается в 65,5 раза, а при 1–4 Вт – в 181 раз, дальнейшее повышение мощности до 130 Вт/л также приводит к повышению вязкости, но уже менее резко – в 207 раз. Измерение других реологических показателей полученных гелей представлено в табл. 3.

Таблица 3

Реологические показатели гелей фукоидана после обработки УЗ при различной мощности

Table 3

Rheological parameters of fucoidan gels after ultrasound treatment at different capacities

Показатели	Время обработки при 65 Вт, мин					
	0	3	5	10	15	20
Прочность, г	11,00± 0,53	11,50± 0,49	12,50± 0,60	13,50± 0,77	16,50± 0,76	16,50± 0,81
Деформация твердости, мм	24,99± 3,44	24,73± 2,90	24,92± 4,00	24,82± 3,31	24,87± 3,48	24,87± 2,73
Цикл восстановимой деформации, мм	29,43± 2,24	27,81± 2,31	27,70± 2,45	26,78± 3,00	25,88± 2,45	23,25± 2,26
Восстановимый рабочий цикл, мJ	2,28± 0,14	2,02± 0,07	1,98± 0,06	1,80± 0,04	1,67± 0,03	1,36± 0,04
Сила сцепления, г	1,50± 0,07	2,50± ,08	2,00± 0,07	1,50± 0,06	1,00± 0,04	1,50± 0,07
Адгезивность, мJ	0,010± 0,004	0,062± 0,003	0,073± 0,005	0,110±0,0 10	0,110± 0,009	0,070± 0,004
Коэффициент упругости	1,02± 0,07	0,93± 0,09	0,85± 0,06	0,72± 0,05	0,57± 0,06	0,45± 0,04
Показатели	Время обработки при 104 Вт, мин					
	3	5	10	15	20	
Прочность, г	14,00±0,49	16,00±0,76	18,00±0,70	21,00±0,83	21,50±0,49	
Деформация твердости, мм	24,91±3,22	24,91±3,74	24,92±3,90	24,81±3,73	24,52±3,00	
Цикл восстановимой деформации, мм	25,77±2,36	24,81±2,21	22,70±2,32	21,83±2,42	19,98±2,52	
Восстановимый рабочий цикл, мJ	1,69±0,04	1,51±0,04	1,15±0,06	0,83±0,06	0,55±0,04	
Сила сцепления, г	1,50±0,10	1,00±0,11	2,00±0,08	2,00±0,04	2,50±0,06	
Адгезивность, мJ	0,040±0,005	0,010±0,002	0,063±0,006	0,162±0,005	0,230±0,010	
Коэффициент упругости	0,62±0,04	0,50±0,02	0,34±0,01	0,22±0,01	0,14±0,01	

Окончание табл. 3

Показатели	Время обработки при 130 Вт, мин				
	3	5	10	15	20
Прочность, г	16,50±0,76	20,0±0,77	21,5±0,93	22,5±0,97	22,0±0,99
Деформация твердости, мм	24,66±2,92	24,35±3,65	24,1±3,32	24,91±3,78	24,82±3,02
Цикл восстановимой деформации, мм	25,66±2,65	24,49±2,54	22,03±2,56	20,16±2,32	17,81±2,81
Восстановимый рабочий цикл, мДж	1,66±0,06	1,43±0,05	0,97±0,06	0,62±0,05	0,39±0,04
Сила сцепления, г	1,00±0,05	1,50±0,04	2,00±0,14	2,5±0,04	2,5±0,06
Адгезивность, мДж	0,010±0,003	0,010±0,003	0,110±0,003	0,170±0,022	0,190±0,019
Коэффициент упругости	0,56±0,04	0,42±0,03	0,27±0,05	0,15±0,03	0,10±0,01

Наиболее значительное влияние УЗ-обработка оказала на прочность, адгезивность и упругость гелей. Динамика изменений этих показателей представлена на рис. 2.

Первоначальное нарастание прочности геля прямо пропорционально применяемой мощности и времени обработки. За весь период обработки различия сохранялись для образцов при 65 Вт и более высоких величинах мощности. Но различия между образцами 104 и 130 Вт со временем нивелировались и через 20 мин приобретали практически равные значения. В целом через 15 мин величины прочности выходили на плато без дальнейшего роста.

Коэффициент упругости имел обратную тенденцию изменений, он снижался со временем обработки для всех образцов и наиболее сильно и практически одинаково (в 10 раз) при мощности 104 и 130 Вт. При этом происходило преобразование полностью эластичного материала в практически полностью вязкий.

Адгезионная способность, соответствующая силе притяжения между поверхностями самого продукта и подложки, наиболее существенно возрастала в начале процесса при 65 Вт, но через 10 мин ее рост прекращался. При мощностях 104 и 130 Вт динамика изменений была практически одинаковой, но в первые 10 мин изменения адгезивности были минимальными, а еще через 10 мин обработки они значительно возросли.

Таким образом, УЗ-обработка гелей, содержащих фукоидан, приводит к значительным изменениям их реологических качеств, вызывая нарастание прочности и вязкости, что может в дальнейшем оказывать влияние на качество пищевой продукции, обогащенной этими компонентами.

Для того чтобы оценить биохимический, в том числе антиоксидантный потенциал полученных продуктов, сравнивали содержание в них непосредственно самого фукоидана и АОА (табл. 4). Эти данные также могут быть полезными для участия в дискуссии о том, является ли чистый фукоидан носителем АОА.

Содержание фукоидана в исходном сухом порошке фукуса составило 8,4 %, что соответствует известным литературным данным [12, 17]. Распределение фукоидана между водным экстрактом и концентратом пищевых волокон (гелем) показало, что некоторая часть фукои-

дана переходит в водный раствор, но большая часть остается в остатке, не растворимом в воде. Такое перераспределение наиболее вероятно связано с существованием различных молекулярных фракций, а также с их связями с другими компонентами водорослей, включая альгинаты и полифенольные соединения, такие как флоротаннины, представляющие собой группу соединений, отличающихся структурой и степенью полимеризации. Содержание последних может достигать 10 % от сухой массы фукусовых водорослей [18]. Согласно литературным данным при водной экстракции в раствор переходят до 60 % флоротаннинов с низкой молекулярной массой от димеров до олигомеров, содержащих до 13 мономерных единиц. Также в раствор переходят белки и аминокислоты, легкогидролизуемые полисахариды и минеральные элементы. Нерастворимый остаток содержит преимущественно альгинаты и фукоидан, а также клетчатку и остаточные количества полифенолов.

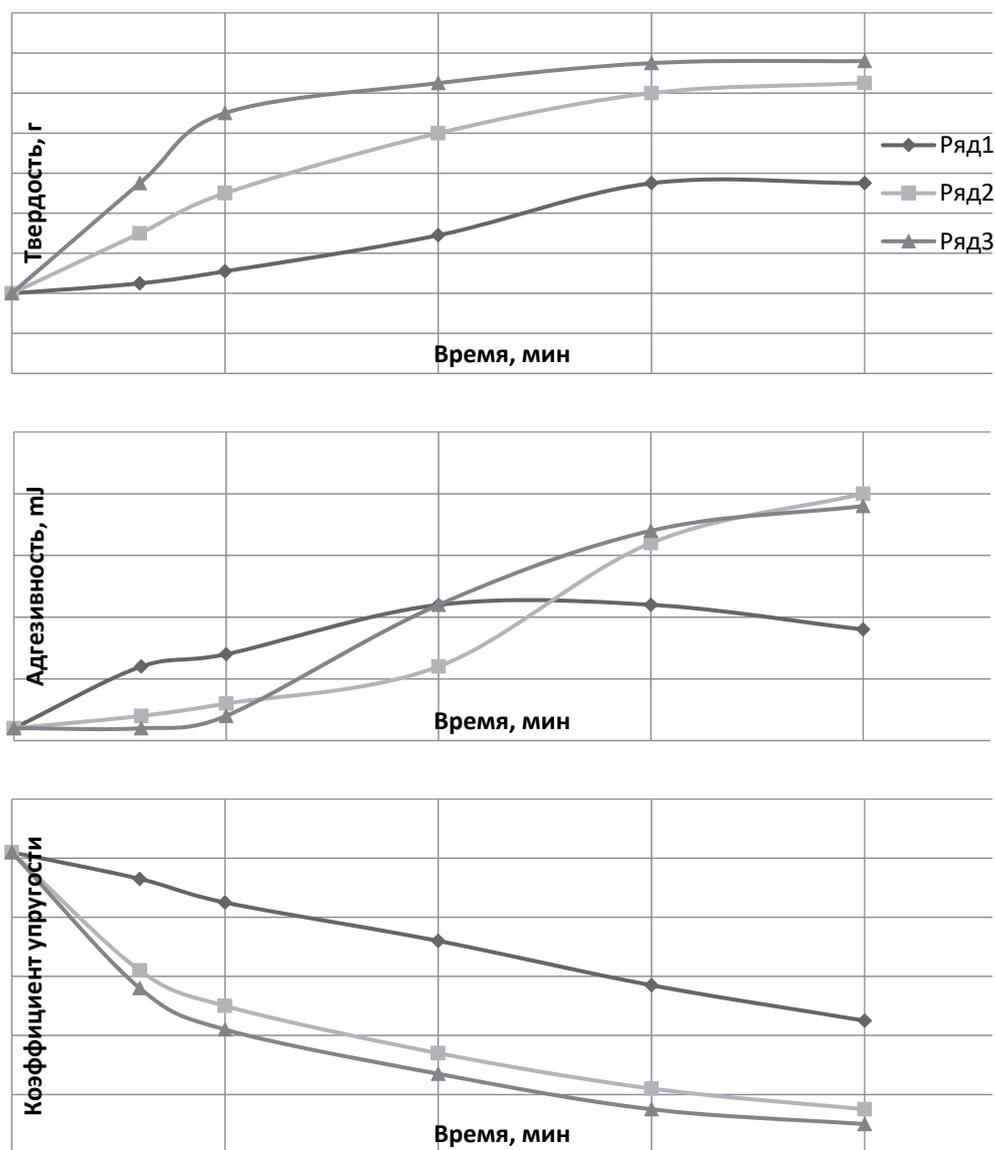


Рис. 2. Влияние времени УЗ-обработки на прочность, адгезивность и упругость гелей фукоидана. Ряд 1 – 65; ряд 2 – 104; ряд 3 – 130 Вт

Fig. 2. The effect of ultrasonic treatment time on the strength, adhesiveness and elasticity of fucoidan gels. Row 1 – 65; row 2 – 104; row 3 – 130 watts

Таблица 4

**Содержание фукоидана в продуктах обработки порошка фукуса
и их антиоксидантная активность**

Table 4

Fucoidan content in fucus powder processing products and their antioxidant activity

Образец	Содержание фукоидана, %	АОА, % общая величина/ пересчет на 1 мг сухих веществ
Фукус порошок	8,4±1,1	45,0±0,4/50,0±0,7
Водный экстракт сублимированный	3,4±0,3	82,3±0,5/91,4±0,8
Гель при различных условиях мощности сонирования, Вт		
Без обработки	16,9±1,2	0,94±0,1/6,8±0,7
УЗ при 65	18,3±0,9	1,22±0,1/11,3±0,8
УЗ при 104	20,0±1,3	4,6±0,23/44,2±2,5
УЗ при 130	23,68±1,7	6,5±0,2/64,7±2,1
Витамин Е	–	79,6±1,7/80,0±0,5

УЗ-обработка гелей после отделения фракции водорастворимых соединений с увеличением ее мощности приводила к последовательному увеличению содержания фукоидана в образующихся гелях.

Согласно концепции природных пищевых волокон с антиоксидантными свойствами (АПВ) их основное свойство – сочетание физиологических эффектов ПВ и антиоксидантов в одном материале. Сравнение проводится с АОА витамина Е (α -токоферола): 1 г АПВ должен иметь способность к поглощению свободных радикалов (по реакции с ДФПГ), эквивалентную 50 мг витамина Е, а содержание ПВ в препарате должно превышать 50 % содержания по сухой массе [19]. Полученные нами продукты соответствуют этим требованиям по обоим обозначенным показателям с учетом того, что в гелях кроме фукоидана содержатся альгинаты, также относящиеся к разряду пищевых волокон.

АОА исходного порошка фукуса достаточно высока для того, чтобы можно было отнести этот продукт к АПВ, однако его органолептические характеристики не позволяют использовать его в чистом виде как добавку в пищевые продукты.

АОА сублимированного водного экстракта значительно повышается по сравнению с исходным продуктом, что связано с переходом в экстракт низкомолекулярных полифенольных соединений. Согласно литературным данным в водный экстракт переходит от 60 до 90 % общего количества этих компонентов [8, 17, 18]. Однако полученные экстракты не обладают гелеобразной структурой, которая может быть полезна при создании формованных мясных и рыбных изделий.

При определении АОА полученных продуктов использовали гели, содержащие до 15 % сухих веществ и сублимированные водные экстракты. Поэтому для корректного сравнения показателей следует рассчитывать этот показатель с поправкой на содержание сухих ве-

ществ, как это показано в табл. 4. С учетом такой поправки АОА гелей имеет достаточно высокий уровень, хорошо сравнимый с АОА витамина Е.

Содержание фукоидана в гелях постепенно повышалось от 17 до 24 % при увеличении мощности сонирования. Одновременно происходил существенный рост АОА, которая увеличилась в 7–10 раз. Это может быть связано с распадом природных полисахаридных комплексов и разрывом более прочных связей с полифенолами. Известно также, что при сонировании фукоидана происходит снижение его молекулярной массы, а наиболее активными в плане антиоксидантной защиты являются компоненты со средней молекулярной массой [8]. При этом полученные гели имеют такие реологические свойства, которые могут быть полезными для применения в технологии формованных изделий.

Приведенные результаты показывают, что полученные гели соответствуют требованиям концепции природных пищевых волокон с антиоксидантными свойствами. В их состав входит от 18 до 24 % фукоидана, а с учетом альгиновых соединений общее количество ПВ составит не менее 50 %, а величина АОА хорошо соотносится с АОА витамина Е.

Таким образом, предлагаемый способ использования УЗ для обработки гелей, полученных при переработке фукуса, позволяет увеличить в них содержание фукоидана и АОА. Наблюдаемые изменения дисперсного состава гелей фукоидана при различных режимах УЗ-обработки свидетельствуют о разрушении крупных конгломератов, образовании однородной микродисперсной системы и нарастании наблюдаемых явлений с увеличением мощности и времени обработки. Показано значительное влияние мощности УЗ-обработки на реологические свойства гелей, содержащих фукоидан, связанные с изменением структуры полисахаридов и их комплексов, разрыв водородных связей и гидратации макромолекул, приводящих к образованию вязких клейстеров. Резкое увеличение динамической вязкости гелей после обработки УЗ сопровождается ростом их прочности и преобразованием полностью эластичного материала в практически полностью вязкий. Сравнение содержания фукоидана и его перераспределения между водорастворимой фракцией и полисахаридными гелями показало, что в водной фракции содержится около 3 % фукоидана, а в сонированных гелях от 17 до 24 %. При этом наиболее высокое значение АОА имеет водорастворимая фракция, содержащая полифенольные соединения. Обработка УЗ позволила повысить АОА гелей от 7 до 64 %. Полученные гели соответствуют требованиям концепции природных пищевых волокон с антиоксидантными свойствами и предлагаются для использования в пищевой промышленности.

Список источников

1. Rodriguez R., Jimenez A., Fernandez-Bolanos J., Guillen R., Heredia A. Dietary fibre from vegetable products as source of functional ingredients // *Trends in Food Science and Technology*. 2006. Vol. 17. P. 3–15.
2. Пивненко Т. Н. Функциональные свойства пищевых волокон и их применение в технологии рыбной продукции // *Пищевые системы*. 2023. Т. 6(2). С. 233–244. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-233-244>.
3. Eskicioglu V., Kamiloglu S., Nilufer-Erdil D. Antioxidant dietary fibres: Potential functional food ingredients from plant processing by-products // *Czech J. Food Sci.* 2015. Vol. 33. P. 487–499.
4. Moreno H. M., Herranz B., Pérez-Mateos M., Sánchez-Alonso I., Borderías J. A. New alternatives in seafood restructured products // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2014. Vol. 56(2). P. 237–248. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.719942>.
5. Потороко И. Ю., Паймулина А. В., Ускова Д. Г. Антиоксидантные свойства функциональных пищевых ингредиентов, используемых при производстве хлебобулочных и молочных продуктов, их влияние на качество и сохраняемость продукции // *Вестник ВГУИТ*. 2017. Т. 79, № 4. С. 143–151. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-4-143-151.

6. Thanh-Sang Voa, Se-Kwon Kim. Fucoidans as a natural bioactive ingredient for functional foods // *Journal of functional foods*. 2013. Vol. 5. P. 16–27.
7. Diaz-Rubio M. E., Perez-Jimenez J., Saura-Calixto F. Dietary fiber and antioxidant capacity in *Fucus vesiculosus* products // *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 2009. Vol. 60(2). P. 3–34.
8. Фукоиданы – сульфатированные полисахариды бурых водорослей. Структура, ферментативная трансформация и биологические свойства / Анастюк С. Д., Беседнова Н. Н., Богданович Л. Н. [и др.]. Владивосток : Дальнаука, 2014. 377 с.
9. Fl'orez-Fern'andez N., Balboa E., Dom'inguez M. Extraction and purification of fucoidan from marine sources. In S.-K. Kim (Ed.), *Encyclopedia of marine biotechnology* (pp. 1095–1125). 2020. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch44>.
10. Ogutu F. O., Mu T., Elahi R., Zhang M., Sun H. Ultrasonic modification of selected polysaccharides – Review // *J Food Process Technol*. 2015. Vol. 6. P. 446. doi:10.4172/2157-7110.1000446.
11. Hmelkov A., Zvyagintseva T., Shevchenko N., Rasin A. B., Ermakova, S. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from brown alga *Fucus evanescens*. Structure and biological activity of the new fucoidan fractions // *Journal of Applied Phycology*. 2018. Vol. 30(3). P. 2039–2046. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1342-9>.
12. Патент № 2385654 Российская Федерация, МПК A23L 1/337, A23L 1/0532. Способ переработки морских водорослей и функциональные продукты (варианты). № 2008126415/13, заявл. 01.07.2008; опубл. 10.04.2010 / А. В. Подкорытова, Л. Х. Вафина, Т. А. Игнатова. Бюл. № 10. 8 с.
13. Усов А. И., Смирнова Г. П., Клочкова Н. Г. Полисахаридный состав некоторых бурых водорослей Камчатки // *Биоорганическая химия*. 2001. Т. 27, № 6. С. 444–448.
14. Qwele K., Hugo A., Oyedemi S. O., Moyo B., Masika P. J., Muchenje V. Chemical composition, fatty acid content and antioxidant potential of meat from goats supplemented with *Moringa oleifera* leaves, sunflower cake and grass hay // *Meat Science*. 2013. Vol. 93. P. 455–462.
15. Suprunchuk V. Ultrasonic-treated fucoidan as a promising therapeutic agent // *Polim Med*. 2021. doi:10.17219/pim/143961.
16. Alboofetileh M., Rezaei M., Tabarsa M., You S. G. Ultrasound-assisted extraction of sulfated polysaccharide from *Nizamuddinina zanardinii*: Process optimization, structural characterization, and biological properties // *Journal of Food Process Engineering*. 2018. Vol. 42. Article e12979. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12979>.
17. Аминина Н. М., Вишневецкая Т. И., Гурулева О. Н., Ковековдова Л. Т. Состав и возможности использования бурых водорослей дальневосточных морей // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2007. № 6(136). С. 123–130.
18. Боголицын К. Г., Дружинина А. С., Овчинников Д. В., Паршина А. Э., Шульгина Е. В., Турова П. Н., Ставрианиди А. Н. Полифенолы арктических бурых водорослей: выделение, полимолекулярный состав // *Химия растительного сырья*. 2019. № 4. С. 65–75. DOI: 10.14258/jcrpm.2019045135.
19. Saura-Calixto F. Antioxidant dietary fiber product: a new concept and a potential food ingredient // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1998. Vol. 46. P. 4303–4306.

Сведения об авторах

Т. Н. Пивненко – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры «Пищевая биотехнология».

Ю. М. Позднякова – кандидат технических наук, директор НИИ инновационных биотехнологий.

Р. В. Есипенко – кандидат технических наук, научный сотрудник НИИ инновационных биотехнологий.

Information about the authors

T. N. Pivnenko – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Food Biotechnology.

Yu. M. Pozdnyakova – PhD in Technical Sciences, Director of Research Institute of Innovative Biotechnology.

R. V. Esipenko – PhD in Technical Sciences, Research Assistant of Research Institute of Innovative Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 11.06.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 10.06.2024; accepted for publication 11.06.2024.