

УДК 577.114+534-8

# Эмульсии Пикеринга на основе модифицированных полисахаридов бурых водорослей для получения пищевых систем нового поколения

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

<sup>2</sup> Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук

И. Ю. Потороко<sup>1</sup>, Кади Аммар Мохаммад Яхья<sup>1</sup>, А.В. Паймулина<sup>2</sup>, Н. В. Науменко<sup>1</sup>

## КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

**Потороко Ирина Юрьевна**  
Адрес: 454080 г. Челябинск,  
Пр. Ленина 86, Россия  
E-mail potorokoi@susu.ru

## ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Потороко, И. Ю., Кади, А. М., Паймулина, А. В., & Науменко, Н. В. (2023). Эмульсии Пикеринга на основе модифицированных полисахаридов бурых водорослей для получения пищевых систем нового поколения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 136–149. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.417>

ПОСТУПИЛА: 02.11.2022

ПРИНЯТА: 05.02.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.03.2023

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ:

статья выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-26-00079.



## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Формирование сегмента продуктов питания нового поколения, обладающих устойчивыми функциональными свойствами связано с рядом проблем, обусловленными значительной вариативностью качества исходного сырья. Одним из путей реализации данного направления может стать использование эмульсии Пикеринга как матрицы для доставки пищевых биоактивных ингредиентов. В качестве стабилизирующих частиц перспективным является использование микроструктурированных растительных полисахаридов, что обуславливает актуальность представленных исследований.

**Цель исследования** — исследование применимости нетепловых эффектов ультразвука для модификации растительных полисахаридов, которые будут использоваться в качестве стабилизирующих частиц в технологии эмульсий, используемых при получении пищевых систем.

**Материалы и методы.** В качестве объектов исследования выступали образцы эмульсий Пикеринга с липидной фракцией на основе льняного масла холодного отжима из семян сорта селекции «Уральский», стабилизированные микроструктурированными Фукоиданом и альгинатом натрия (Alg–Na). Для микроструктурирования применены эффекты кавитации с параметрами:  $22 \pm 1,65$  кГц и интенсивностью излучения не менее 10 Вт/см<sup>2</sup>.

**Результаты.** В ходе исследования оценивали антиоксидантную активность, дисперсные характеристики и морфологические изменения структуры частиц, а также характер встраивания их в эмульсии Пикеринга. Установлены рациональные режимы микроструктурирования. Отмечено увеличение антирадикальной активности для Фукоидана — в 5,2 раза (630 Вт/л; 30 мин), для Alg–Na — в 7,4 раза (630 Вт/л; 18 мин). После сонохимического микроструктурирования микрочастицы полисахаридов по-разному укладываются в системе эмульсии Пикеринга, что влияет на их вязкость и устойчивость.

**Выводы.** Представленные исследования подтверждают эффективность микроструктурирования полисахаридов бурых водорослей для стабилизации эмульсий Пикеринга, что обеспечивает возможность их применения в технологии пищевых систем нового поколения.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

эмульсии Пикеринга, микроструктурирование, полисахариды бурых водорослей, ультразвуковое воздействие

# Pickering Emulsions Based on Modified Brown Algae Polysaccharides for the Production of New Generation Food Systems

<sup>1</sup> South Ural State University (National Research University)

<sup>2</sup> Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences

Irina Yu. Potoroko<sup>1</sup>, Ammar M.Y. Kadi<sup>1</sup>, Anastasia V. Paymulina<sup>2</sup>, Natalia V. Naumenko<sup>1</sup>

## CORRESPONDENCE:

**Irina Yu. Potoroko**

Address: 454080 Chelyabinsk,  
86 Lenin Ave., Russia  
E-mail potorokoi@susu.ru

## FOR CITATIONS:

Potoroko, I. Yu., Kadi, A. M., Paymulina, A. V., & Naumenko, N. V. (2023). Pickering emulsions based on modified brown algae polysaccharides for the production of new generation food systems. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 136–149. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.417>

RECEIVED: 02.11.2022

ACCEPTED: 05.02.2023

PUBLISHED: 30.03.2023

## DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



## ABSTRACT

**Introduction.** The formation of a segment of a new generation of food products with stable functional properties is associated with a number of problems due to the significant variability in the quality of the feedstock. One of the ways to implement this direction can be the use of Pickering's emulsion as a matrix for the delivery of food bioactive ingredients. As stabilizing particles, the use of microstructured plant polysaccharides is promising, which determines the relevance of the presented studies.

**Purpose** of the study is to study the applicability of non-thermal ultrasound effects for the modification of plant polysaccharides, which will be used as stabilizing particles in the technology of emulsions used in the production of food systems.

**Materials and Methods.** The objects of the study were samples of Pickering emulsions with a lipid fraction based on cold-pressed linseed oil «Uralsky», stabilized with microstructured Fucoidan and sodium alginate (Alg–Na). For microstructuring, cavitation effects are applied, generated by low-frequency ultrasound with a frequency of mechanical vibrations of  $22 \pm 1.65$  kHz and a radiation intensity of at least  $10$  W/cm<sup>2</sup>.

**Results.** During the study, the antioxidant activity, disperse characteristics and morphological changes in the structure of particles, as well as the nature of their incorporation into Pickering emulsions, were evaluated. Established rational modes of microstructuring. An increase in antiradical activity against DPPH was noted for fucoidan – 5.2 times (630 W/l; 30 min), for Alg–Na – 7.4 times (630 W/l; 18 min). After sonochemical microstructuring, polysaccharide microparticles stack differently in the Pickering emulsion system, which affects the viscosity and stability over time.

**Conclusions.** The presented studies confirm the effectiveness of sonochemical microstructuring of brown algae polysaccharides for stabilizing Pickering emulsions with proven bioactivity, which makes it possible to use them in the technology of food systems of a new generation.

## KEYWORDS

Pickering emulsions, microstructuring, brown algae polysaccharides, ultrasound exposure

## ВВЕДЕНИЕ

Несбалансированное питание является триггером для целого ряда хронических заболеваний. Имеющиеся технологические и сырьевые ресурсы не позволяют в условиях разрыва технологий обеспечить устойчивую стабильность заявленных свойств продуктов питания. При формировании сегмента продуктов питания нового поколения, обладающих устойчивыми функциональными и здоровьесберегающими свойствами необходимы изменения в технологиях производства (Tang, 2020).

Для обеспечения устойчивости пищевых систем при значительной вариативности качества исходного сырья производителям требуются новые технологические решения, к числу которых возможно отнести эмульсии Пикеринга (ЭП) (Cen et al., 2022). Применение ЭП в технологиях пищевых производств, либо в качестве заменителей жира, либо для доставки пищевых биоактивных ингредиентов создает новые преимущества с точки зрения получения продуктов направленного профилактического действия (Huang et al., 2021).

Предлагаемые научным сообществом решения для использования ЭП в технологии продуктов питания обусловлены их способностью стабилизировать эмульсионную пищевую систему за счет сильной энергии сцепления и специфическому поверхностному взаимодействию (снижение межфазного натяжения). Обогащенные природными биоактивными компонентами ЭП, способные сохранять стабильность во времени они способны компенсировать проблемы как полифункциональные ингредиенты для пищевых систем (Zou et al., 2015).

Разработки последних лет доказывают применимость ЭП для пищевой индустрии с целью стабилизации эмульсионных пищевых систем независимо от их типа. Однако, в литературе представлены разные мнения об эффективности полноценной загрузки биологически активных веществ в структуру эмульсии и их сохранения при размещении в матрице продукта (Dhiman et al., 2021). Автор отмечает, что эффективность данного процесса в значительной степени может варьироваться и зависит от равномерности распределения биологически активных веществ в эмульсионной системе на этапе формирования прочного физического барьера, препятствующего ее разрушению. Ряд исследо-

вателей (Gong et al., 2020; Perrin et al., 2014; Tang, 2020), указывают на низкую стабильность данных систем, что обуславливает необходимость поиска экологически безопасных и экономически выгодных природных низкомолекулярных поверхностно-активных веществ, которые могут стабилизировать эмульсии Пикеринга (Li et al., 2021).

В качестве стабилизирующих компонентов рядом исследователей предлагаются различные компоненты. Так, доказано, что белки рыб могут образовывать физический барьер между дисперсной фазой для стабилизации эмульсий (Ribeiro et al., 2021). Предложения стабилизирующих частиц для ЭП, применимых в технологии пищевых систем включают гранулы крахмала (Zhang et al., 2013), глобулярные белковые наночастицы (Gong et al., 2020), белковые микрогели (Jiao et al., 2018), частицы целлюлозы (Chen et al., 2018), микрогели хитозана (Mok et al., 2019), желатин (Rui et al., 2014), нанокристаллы хитина (Perrin et al., 2014), белково-полисахаридные комплексы (Sun et al., 2020a) и так далее.

В качестве эффективных стабилизаторов эмульсии Пикеринга могут выступать микрочастицы, полученные на основе полисахаридов, которые подходят за счет биосовместимости с основными компонентами среды. Микрочастицы, обладающие биоактивностью, встраиваясь в матрицу продукта способны достигать соответствующих отделов организма человека, что полностью в дальнейшем обеспечит их функциональные свойства. При этом стабильность и свойства ЭП, нагруженных растительными компонентами, зависят от правильно подобранных соотношений основных фракции системы, свойств вносимого растительного компонента, а также факторов воздействия.

Одним из подходов, обеспечивающих создание, стабильность и заданные свойства ЭП может являться применение физических методов воздействия для процесса микроструктурирования растительных полисахаридов, выступающих в роли стабилизаторов системы. Исследования (Potoroko et al., 2018; Ashokkumar, 2015) доказывают, что обработка низкочастотным ультразвуком (УЗВ) является одним из наиболее часто применяемых физическим методом используемых для модификации биоактивных соединений. В пищевой промышленности предпочтение отдается низкочастотному ультразвуку в диапазоне 15–100 кГц, поскольку в этом

диапазоне происходит кавитация, вызывающая деполимеризацию высокомолекулярных углеводов и ускоряющая их встраивание в систему ЭП как поверхностно-активного компонента (Wani et al., 2022). Применение УЗВ в эмульгировании/гомогенизации способствует экономичному образованию эмульсии с минимальным использованием эмульгаторов для поддержания стабильности эмульсии (Dhiman et al., 2021; Kiani et al., 2011). Таким образом, была сформулирована гипотеза о возможности применения кавитационных эффектов ультразвука в качестве инструмента для процесса микроструктурирования растительных полисахаридов.

Цель исследования — исследование применимости нетепловых эффектов ультразвука для модификации растительных полисахаридов, которые будут использоваться в качестве стабилизирующих частиц в технологии эмульсий, используемых при получении пищевых систем.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Объекты

В качестве стабилизирующих соединений были определены полисахариды водорослей: высокосульфатированный фукан, выделенный из бурых водорослей *Fucus evanescens*, имеющий гетерополимерное строение (Фукоидан) (СГФ (ТУ 9284–067-02698170–2010, ТИВОХ ДВО РАН, Россия) и альгинат натрия (Alg–Na) из бурых водорослей *Laminaria Digitata* и *Laminaria Saccharina* (ТУ 15–544-83, ТОРСПИЦЕ, Россия). Для наилучшего представления механизмов взаимодействия стабилизирующих соединений представлены их пространственные 3D-структуры (Рисунок 1).

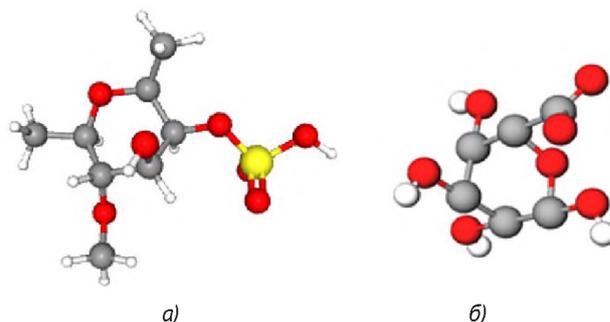
Объектами исследования являлись образцы эмульсий Пикеринга с липидной фракцией на основе льняного масла холодного отжима из семян сорта селекции «Уральский», стабилизированные микроструктурированными Фукоиданом и Alg–Na.

### Инструменты и оборудование

Для определения эффектов ультразвука для модификации растительных полисахаридов был проведен процесс микроструктурирования. В качестве

Рисунок 1

Пространственная 3D-структура молекул Фукоидана (а) и альгиновой кислоты (б)



Примечание. What is PubChem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>). In public domain.

\*Трехмерные структуры веществ получены с базы данных PubChem, оптимизированной с использованием Ligands Input в AD 4.2.

\*\*Атомы выделены цветом: серым — углерод; белым — водород; красным — кислород; желтым — сера.

воздействующего фактора были применены нетепловые эффекты кавитации, генерируемые низкочастотным ультразвуком с частотой механических колебаний  $22 \pm 1,65$  кГц и интенсивностью излучения не менее  $10 \text{ Вт/см}^2$ . В качестве генератора ультразвука использовали аппарат ультразвуковой технологической погружной «Волна-Л» модель УЗТА-0,63/22-ОЛ с рабочим инструментом грибкового типа. Технические возможности используемого ультразвукового аппарата позволяют регулировать мощность (в диапазоне 190–630 Вт).

В целях обеспечения стабильности заявленных биологически-активных свойств в ведении процесса микроструктурирования использовали систему принудительного охлаждения для поддержания температуры на уровне  $50^\circ\text{C}$ . Для микроструктурирования готовили 1%-е водные растворы Фукоидана и Alg–Na. Контрольные образцы были получены путем растворения данных полисахаридов в дистиллированной воде с температурой  $50^\circ\text{C}$ .

Полученные водные суспензии вводили в липидную фракцию в соотношении 9:1 и обрабатывали низкочастотным ультразвуком мощностью 630 Вт/л в течение 16 мин (последовательно по 4 мин с перерывом 3 мин) при контроле температуры не выше  $50^\circ\text{C}$ .

## Методы

Антирадикальную активность контрольных и микроструктурированных образцов Фукоидана и Alg-Na оценивали спектрофотометрически путем определения поглощающей способности свободного радикала 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила (DPPH). Поглощение образцов определяли с использованием спектрофотометра Jenway (6405 UV/Vis, Англия) при 515 нм.

Размер частиц контрольных и микроструктурированных образцов Фукоидана и Alg-Na исследовали методом динамического рассеяния света на лазерном анализаторе размера частиц Nanotracs Ultra и Microtracs S3500 (Microtracs Inc., США).

Снимки для оценки морфологической структуры контрольных и микроструктурированных образцов Фукоидана и Alg-Na были получены с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения (растровый электронный микроскоп Jeol JSM-7001F, Япония), увеличение от  $\times 500$  до  $\times 10\,000$ .

Исследование вязкости ЭП проводилось посредством определения камертонной вязкости на вискозиметре серии SV-10 (A&D, Япония).

## Анализ данных

Исследования проводились в трехкратной повторности. Для решения задач оптимизации, получения поверхности отклика и уравнений регрессии, описывающих влияние ультразвукового микроструктурирования на антирадикальную активность Фукоидана и Alg-Na. На проводилась математическая обработка данных с применением двухфакторного регрессионного анализа. В качестве переменных факторов были выбраны продолжительность, мин ( $X$ ) и мощность ультразвукового воздействия, Вт/л ( $Y$ ). Контролируемым параметром являлось значение антирадикальной активности, DPPH, % ( $Z$ ).

Экспериментальные данные обрабатывали методом математической статистики с использованием программы Statistica 12. Полученные данные представлены с коэффициентом достоверности 0,95.

## Процедура исследования

На первом этапе исследований были получены 1%-е водные суспензии Фукоидана и Alg-Na. Для проведения процесса микроструктурирования использовали низкочастотный ультразвук с частотой механических колебаний  $22 \pm 1,65$  кГц («Волна-Л» модель УЗТА-0,63/22-ОЛ) мощностью воздействия — 630 Вт/л в течение 20 мин (последовательно по 5 мин с перерывом 3 мин) при контроле температуры не выше 50 °С. Далее полученные водные суспензии вводили в липидную фракцию (льняного масла холодного отжима из семян сорта селекции «Уральский») в соотношении 9:1 и обрабатывали ультразвуком мощностью 630 Вт/л в течение 16 мин (последовательно по 4 мин с перерывом 3 мин) при контроле температуры не выше 50 °С.

На втором этапе исследования, проводили оценку показателей по следующей номенклатуре: антирадикальная активность, размер частиц и морфологическая структура образцов суспензий Фукоидана и Alg-Na; вязкость и морфологическая структура полученных Эмульсий Пикеринга.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование пищевой системы, обладающей добавленной полезностью возможно за счет использования новых технологических решений получения физически и химически стабильных, устойчивых в хранении Эмульсий Пикеринга. Выбранные в качестве обогатителя полисахариды водорослей: Фукоидан и Alg-Na обладают комплексом доказанных биоактивных свойств, но имеют ограничительные барьеры (в частности, высокую молекулярную массу), которая снижает эффективность их применения в качестве биоусвояемых фортификаторов пищевых систем, включая эмульсии. Изучение исходных свойств полисахаридов бурых водорослей и поиск подходов минимизации ограничительных барьеров для их применения в качестве стабилизирующих компонентов в технологии эмульсий Пикеринга стало основным направлением первого этапа исследований.

## Эффективность использования полисахаридов бурых водорослей в системе пищевых продуктов

В многочисленных исследованиях (Таблица 1) за последние 10 лет сообщается о том, что альгинаты и фукоиданы обладают функционально-технологическими (стабилизирующими, гелеобразующими, эмульгирующими) и биологически активными свойствами, ниже приведены ссылки на исследования доказывающие заявленные свойства.

**Таблица 1**

Биологически активные свойства Фукоидана и Alg-Na

Наименования свойства	Наименование биологически активного вещества, ссылки на авторов доказательных исследований	
	Гетерополисахарид Фукоидан	Альгинат натрия (Alg-Na)
Антиоксидантная активность	Wang, 2019; Imbs, 2021; Koh, 2019	Sellimi, 2015; Torabi, 2022; Benslima, 2021
Антивирусная активность	Sun, 2020b; Krylova, 2020; Sun, 2018	Serrano-Aroca, 2021; Sano, 1999
Радиопротекторные свойства	Zvyagintseva, 2021; Lee, 2008; Wu, 2020	Сведения не установлены
Противоопухолевое и иммуномодулирующее действие	Tomori, 2019; Peng, 2019; Atashrazm, 2015	Сведения не установлены
Антикоагулянтная и антитромботическая активность	Zhao, 2016; Cui, 2018; Lin, 2022	Сведения не установлены
Сорбирующие свойства	Сведения не установлены	Kolodyńska, 2018; Wang, 2016; Cordova, 2018

Представленные данные свидетельствуют о выраженных антиоксидантных, противовирусных, иммуномодулирующих и др. свойствах данных соединений. При этом ряд авторов (Zhao et al., 2016; Lin et al., 2022; Torabi, 2022; Benslima et al., 2021) отмечают снижение эффективности их применения в качестве биоусвояемых фортификатов пищевых систем, включая эмульсии Пикеринга, что обуславливает необходимость поиска новых подходов, таких как ультразвуковое воздействие.

## Влияние ультразвукового воздействия на антиоксидантные свойства бурых водорослей

Результаты исследования влияния параметров низкочастотного ультразвука, используемого для микроструктурирования Фукоидана и Alg-Na на ингибирование 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) представлены в Таблице 2.

**Таблица 2**

Влияние ультразвукового воздействия при ведении процесса микроструктурирования на антирадикальную активность фукоидана и альгината натрия

Мощность воздействия, Вт/л	Длительность УЗВ, мин	Ингибирование DPPH, %	
		Фукоидан	Alg-Na
0	0	24,6	20,2
240	20	30,2	21,3
240	25	30,8	29,2
240	30	31,1	19,7
435	20	37,4	95,8
435	25	92,1	114,9
435	30	95,3	88,8
630	20	106,9	149,6
630	25	125,6	120,3
630	30	127,8	82,1

В результате ультразвукового микроструктурирования отмечено увеличение антирадикальной активности Фукоидана и Alg-Na в отношении DPPH. С увеличением мощности воздействия происходит наращивание данного показателя для Фукоидана — в 5,2 раза (630 Вт/л; 30 мин), для альгината натрия — в 7,4 раза (630 Вт/л; 20 мин).

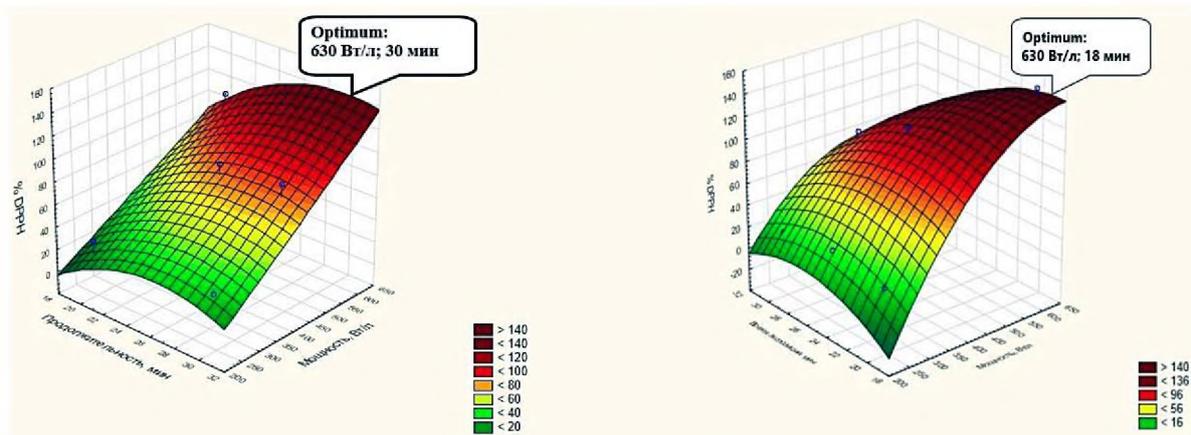
В результате решения задачи оптимизации были получены поверхности отклика и уравнения регрессии (Рисунок 2), описывающие влияние ультразвукового микроструктурирования на антирадикальную активность Фукоидана и Alg-Na.

## Влияние ультразвукового воздействия на морфологию и размер частиц бурых водорослей

Проведено исследование влияния ультразвукового микроструктурирования на морфологию и размер частиц Фукоидана и Alg-Na с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и метода динамического рассеяния света (Рисунок 3).

**Рисунок 2**

Поверхности отклика и уравнения регрессии зависимости значения антирадикальной активности от параметров ультразвукового микроструктурирования



$$Z = 0,455 \cdot X^2 + 1,227 \cdot 10^{-5} Y^2 + 0,005 \cdot XY + 23,193 \cdot X + 0,09 \cdot Y - 310,102$$

$$Z = -7,749 \cdot 10^{-4} \cdot X^2 - 0,477 \cdot Y^2 - 0,017 \cdot XY + 1,337 \cdot X + 28,647 \cdot Y - 561,89$$

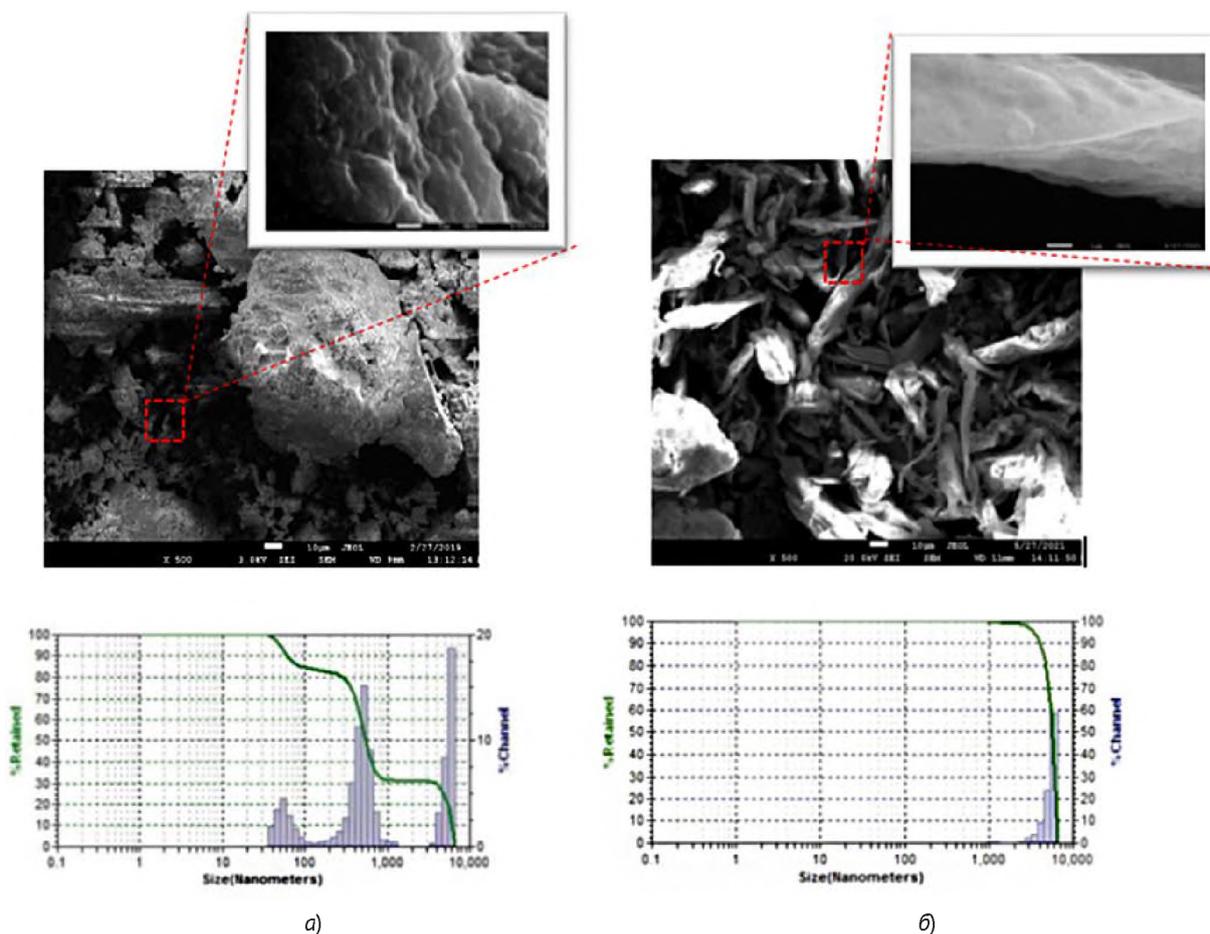
а)

б)

Примечания: (а) Фукоидана; (б) Alg-Na

**Рисунок 3**

Результаты исследования влияния ультразвукового микроструктурирования на морфологию и размер частиц



а)

б)

Примечание. (а) Фукоидан; (б) Alg-Na

Анализ СЭМ-изображений доказал, что ультразвуковое микроstructuring обеспечивает структурные изменения полисахаридов бурых водорослей. Фукоидан представляет собой частицы неправильной формы разных размеров (32,14 мкм – 77,1%; 103,90 мкм – 22,9%). При ультразвуковом микроstructuring наблюдается деполимеризация частиц (664 нм – 83,6%; 2868 нм – 16,4%). Полученные данные согласуются с результатами исследований (Hmelkov, 2018).

Alg-Na в нативной форме представляет собой частицы нитевидной иррациональной формы с гладкой структурой поверхности (размером преимущественно 5650 нм). После ультразвукового микроstructuring наблюдается деполимеризация крупных конгломератов, образуются более короткие элементы (размером 5670 нм – 30,6%; 502 нм – 53,4%; 56,1 нм – 16%), а в СЭМ изображениях на поверхности частиц визуализируется наличие ячеистости и присутствие надрывов.

Для оценки применимости микроstructuring фукоидана и Alg-Na в качестве стабилизирующих

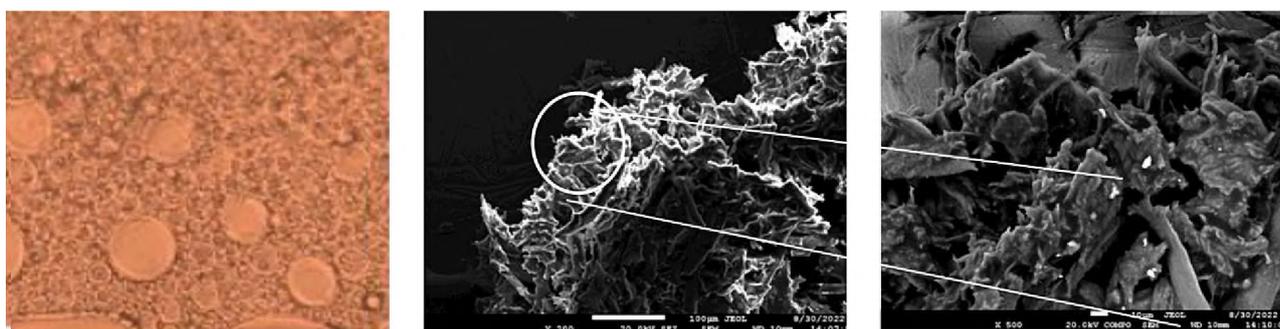
биоактивных частиц эмульсий Пикеринга в экспериментальных исследованиях учитывались реологические характеристики (вязкость, мПа · с) и показатели биоактивности (АОА, DPPH, %).

### Оценке применимости микроstructuring фукоидана и Alg-Na в составе эмульсий Пикеринга

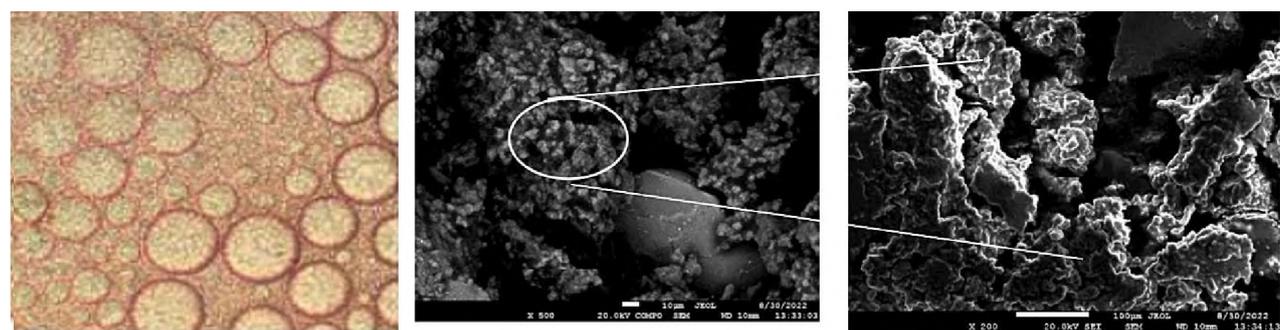
Полисахариды бурых водорослей, широко применяются в технологиях пищевых продуктов, обладая доказанной биоактивностью и способностью формировать устойчивые гели, они могут стать эффективными технологически применимыми стабилизирующими компонентами, обеспечивающими устойчивость ЭП. Neenu Sharma (2023) в своих исследованиях подчеркивает, что размер частиц имеет прямую зависимость со стабильностью ЭП. Именно адсорбция мелких частиц на поверхности капель ЭП отвечает за их коллоидную стабильность, так как механизм их стабилизации сильно отличается от традиционного механизма создания молекулярной адсорбции межфазными пленками. В свя-

#### Рисунок 4

Результаты исследования состояния эмульсий Пикеринга стабилизированных микроstructuring полисахаридов бурых водорослей



Эмульсия Пикеринга стабилизированная микроstructuring Alg-Na



Эмульсия Пикеринга стабилизированная микроstructuring Фукоиданом

зи с чем наиболее важно проводить исследования по размещению Фукоидана и Alg-Na в матрице ЭП.

Частицы микроструктурированных полисахаридов бурых водорослей по-разному укладываются в матрице ЭП (Рисунок 4), а также влияют на вязкость и устойчивость эмульсий во времени. Следует отметить, что ЭП, стабилизированные микроструктурированным Фукоиданом, обладали вязкостью более низкой ( $20,3 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ), нежели ЭП, стабилизированные микроструктурированным Alg-Na ( $580 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ). При хранении в течение 24 часов ЭП, стабилизированные Фукоиданом сохраняли стабильность, в то время как в ЭП, стабилизированные Alg-Na имели незначительное расслоение, без образования крупных флоккул. Микроструктурированные Фукоидан и Alg-Na в составе ЭП сохраняют биоактивность, что подтверждают данные их антирадикальной активности, соответственно  $5,120 \pm 0,005 \text{ DPPH, \%}$  и  $4,162 \pm 0,004 \text{ DPPH, \%}$ .

Микрофотографии СЭМ достоверно подтверждают образование эмульсии «масло-вода», капли масла в дисперсной среде распределяются равномерно без возникновения флокуляции. Образовавшийся межфазный барьер микроструктурированными биоактивными частицами Фукоидана и Alg-Na предотвращает коалесценцию эмульсии Пикеринга, что также подтверждают показатели ее стабильности при воздействии агрессивных факторов, что доказывает возможность использования ЭП наполненных биоактивными частицами модифицированных полисахаридов бурых водорослей в составе пищевых систем.

Полученные результаты подтверждают данные (Hmelkov et al., 2018; Potoroko et al., 2018; Ashokkumar, 2015) о том, что ультразвуковое воздействие обеспечивает структурные изменения полисахаридов бурых водорослей. При этом авторами впервые доказано, что сформированный микроструктурированными биоактивными частицами Фукоидана и Alg-Na межфазный барьер предотвращает коалесценцию эмульсии Пикеринга и делает их более стабильными в матрице пищевой системы.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования подтвердили эффективность сонохимического микроструктурирования полисахаридов бурых водорослей для получения микрочастиц частиц обладающих доказанной биоактивностью, способных эффективно стабилизировать Эмульсии Пикеринга. Встроенные в систему эмульсии микрочастицы полисахаридов, работают как поверхностно-активные вещества. Поэтому состояние обогатителя, его подтвержденная биологическая ценность может быть стабильна только при минимизации воздействующего фактора либо создания защитного слоя в сложных эмульсионных системах. Сочетание свойств поверхностно-активных и биологически активных веществ сонохимически микроструктурированных Фукоидана и Alg-Na обеспечивает возможности их применения в технологии эмульсионных пищевых систем нового поколения. В соответствии с изначальной гипотезой применение кавитационных эффектов ультразвука в качестве инструмента для процесса микроструктурирования растительных полисахаридов позволило обеспечить стабильность и безопасность разработанных Эмульсий Пикеринга. Интересным и перспективным видится дальнейшее развитие исследований в данном направлении, что позволит сформировать достаточную доказательную базу в отношении применимости стабилизированных эмульсии для пищевых систем с различным нутриентным составом.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Потороко Ирина Юрьевна** — концептуализация, разработка методологии исследования, руководство исследованием, получение финансирования.

**Кади Аммар Мохаммад Яхья** — проведение исследования, написание — подготовка черновика рукописи, работа с программным обеспечением.

**Паймулина Анастасия Валерияновна** — написание — подготовка черновика рукописи, работа с программным обеспечением.

**Науменко Наталья Владимировна** — написание-редактирование рукописи, визуализация.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ashokkumar, M. (2015). Applications of ultrasound in food and bioprocessing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 25, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.012>
- Atashrazm, F., Lowenthal, R. M., Woods, G. M., Holloway, A. F., & Dickinson, J. L. (2015). Fucoidan and cancer: A multifunctional molecule with anti-tumor potential. *Marine Drugs*, 13(4), 2327–2346. <https://doi.org/10.3390/md13042327>
- Benslima, A., Sellimi, S., Hamdi, M., Nasri, R., Jridi, M., Cot, D., Li, S., Nasri, M., & Zouari, N. (2021). The brown seaweed *Cystoseira schiffneri* as a source of sodium alginate: Chemical and structural characterization, and antioxidant activities. *Food Bioscience*, 40, Article 100873. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100873>
- Cen, S., Li, Z., Guo, Z., Li, H., Shi, J., Huang, X., Zou, X., & Holmes, M. (2022). 4D printing of a citrus pectin/ $\beta$ -CD Pickering emulsion: a study on temperature induced color transformation. *Additive Manufacturing*, 56, Article 102925. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102925>
- Chen, Q. H., Zheng, J., Xu, Y. T., Yin, S. W., Liu, F., & Tang, C. H. (2018). Surface modification improves fabrication of pickering high internal phase emulsions stabilized by cellulose nanocrystals. *Food Hydrocolloids*, 75, Article 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.005>
- Córdova, B. M., Jacinto, C. R., Alarcón, H., Mejía, I. M., López, R. C., de Oliveira Silva, D., Valderrama, A. C. (2018). Chemical modification of sodium alginate with thiosemicarbazide for the removal of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 2259–2270. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.095>
- Cui, K., Tai, W., Shan, X., Hao, J., Li, G., & Yu, G. (2018). Structural characterization and anti-thrombotic properties of fucoidan from *nemacystus decipiens*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1817–1822. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.079>
- Dhiman, A., & Prabhakar, P. K. (2021). Micronization in food processing: A comprehensive review of mechanistic approach, physicochemical, functional properties and self-stability of micronized food materials. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110248. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110248>
- Gong, J., Wang, S., Wang, J., Feng, W., Peng, H., Tang, J., & Yu, P. S. (2020). Attentional graph convolutional networks for knowledge concept recommendation in moocs in a heterogeneous view. In *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 79–88). <https://doi.org/10.1145/3397271.3401057>
- Sharma, H., Sharma, S., Bajwa, J., Chugh, R., Kumar, D. (2023). Polymeric carriers in probiotic delivery system *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, Article 100301, <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100301>
- Hmelkov, A. B., Zvyagintseva, T. N., Shevchenko, N. M. (2018). Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from brown alga *Fucus evanescens*. Structure and biological activity of the new fucoidan fractions. *Journal of Applied Phycology*, 30(3), 2039–2046. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1342-9>
- Huang, M., Wang, J., & Tan, C. (2021). Tunable high internal phase emulsions stabilized by cross-linking/electrostatic deposition of polysaccharides for delivery of hydrophobic bioactives. *Food Hydrocolloids*, 118, Article 106742. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106742>
- Imbs, T. I., & Ermakova, S. P. (2021). Can Fucoidans of Brown Algae Be Considered as Antioxidants? *Russian Journal of Marine Biology*, 47(3), 157–161. <https://doi.org/10.1134/S1063074021030056>
- Jiao, B., Shi, A., Wang, Q., & Binks, B. P. (2018). High-internal-phase pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications. *Angewandte Chemie*, 130(30), 9418–9422. <https://doi.org/10.1002/ange.201801350>
- Kiani, H., Zhang, Z., Delgado, A., & Sun, D. W. (2011). Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing. *Food Research International*, 44(9), 2915–2921. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.051>
- Koh, H. S. A., Lu, J., & Zhou, W. (2019). Structure characterization and antioxidant activity of fucoidan isolated from *Undaria pinnatifida* grown in New Zealand. *Carbohydrate polymers*, 212, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.040>
- Kolodyńska, D., Gęca, M., Skwarek, E., & Goncharuk, O. (2018). Titania-coated silica alone and modified by sodium alginate as sorbents for heavy metal ions. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), Article 96. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2512-7>
- Krylova, N. V., Ermakova, S. P., Lavrov, V. F., Leneva, I. A., Kompanets, G. G., Iunikhina, O. V., & Zaporozhets, T. S. (2020). The comparative analysis of antiviral activity of native and modified fucoidans from brown algae *Fucus evanescens* in vitro and in vivo. *Marine drugs*, 18(4), Article 224. <https://doi.org/10.3390/md18040224>
- Lee, J., Kim, J., Moon, C., Kim, S. H., Hyun, J. W., Park, J. W., Shin, T. (2008). Radioprotective effects of fucoidan in mice treated with total body irradiation. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 22(12), 1677–1681. <https://doi.org/10.1002/ptr.2562>
- Li, Q., Wu, Y., Fang, R., Lei, C., Li, Y., Li, B., & Luo, X. (2021). Application of Nanocellulose as particle stabilizer in food Pickering emulsion: Scope, Merits and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.027>
- Lin, P., Chen, S., Liao, M., & Wang, W. (2022). Physicochemical Characterization of Fucoidans from *Sargassum hen-*

- slowianum C. Agardh and Their Antithrombotic Activity In Vitro. *Marine Drugs*, 20(5), Article 300. <https://doi.org/10.3390/md20050300>
- Marefati, A., Sjöö, M., Timgren, A., Dejmek, P., & Rayner, M. (2015). Fabrication of encapsulated oil powders from starch granule stabilized W/O/W Pickering emulsions by freeze-drying. *Food Hydrocolloids*, 51, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.04.022>
- Mok, T. S., Wu, Y. L., Kudaba, I., Kowalski, D. M., Cho, B. C., Turna, H. Z., & Lu, S. (2019). Pembrolizumab versus chemotherapy for previously untreated, PD-L1-expressing, locally advanced or metastatic non-small-cell lung cancer (KEYNOTE-042): A randomised, open-label, controlled, phase 3 trial. *The Lancet*, 393(10183), 1819–1830. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32409-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32409-7)
- Peng, Y., Song, Y., Wang, Q., Hu, Y., He, Y., Ren, D., & Zhou, H. (2019). In vitro and in vivo immunomodulatory effects of fucoidan compound agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 127, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.197>
- Perrin, E., Bizot, H., Cathala, B., & Capron, I. (2014). Chitin nanocrystals for Pickering high internal phase emulsions. *Biomacromolecules*, 15(10), 3766–3771. <https://doi.org/10.1021/bm5010417>
- Potoroko, I. Yu., Kalinina, I. V., Naumenko, N. V., Fatkulina, R. I., Nenasheva, A. V., Uskova, D. G., Sonawane, S. H., Ivanova, D. G., & Velyamov, M. T. (2018). Sonochemical micronization of taxifolin aimed at improving its bioavailability in drinks for athletes. *Human. Sport. Medicine*, 18(3), 90–100. <https://doi.org/10.14529/hsm180309>
- Ribeiro, E. F., Morell, P., Nicoletti, V. R., Quiles, A., & Hernandez, I. (2021). Protein- and polysaccharide-based particles used for Pickering emulsion stabilisation. *Food Hydrocolloids*, 119, Article 106839. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106839>
- Rui, X., Tan, H., & Yan, Q. (2014). Nanostructured metal sulfides for energy storage. *Nanoscale*, 6(17), 9889–9924. <https://doi.org/10.1039/C4NR03057E>
- Sano, Y. (1999). Antiviral activity of alginate against infection by tobacco mosaic virus. *Carbohydrate Polymers*, 38(2), 183–186. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(98\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00119-2)
- Sellimi, S., Younes, I., Ayed, H. B., Maalej, H., Montero, V., Rinaudo, M., & Nasri, M. (2015). Structural, physicochemical and antioxidant properties of sodium alginate isolated from a Tunisian brown seaweed. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1358–1367. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.016>
- Serrano-Aroca, A., Ferrandis-Montesinos, M., & Wang, R. (2021). Antiviral properties of alginate-based biomaterials: Promising antiviral agents against SARS-CoV-2. *ACS Applied Bio Materials*, 4(8), 5897–5907. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00523>
- Sun, Q. L., Li, Y., Ni, L. Q., Li, Y. X., Cui, Y. S., Jiang, S. L., & Dong, C. X. (2020a). Structural characterization and antiviral activity of two fucoidans from the brown algae *Sargassum henslowianum*. *Carbohydrate Polymers*, 229, Article 115487. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115487>
- Sun, S. H., Chen, Q., Gu, H. J., Yang, G., Wang, Y. X., Huang, X. Y., & Wang, Y. C. (2020b). A mouse model of SARS-CoV-2 infection and pathogenesis. *Cell Host & Microbe*, 28(1), 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2020.05.020>
- Sun, T., Zhang, X., Miao, Y., Zhou, Y., Shi, J., Yan, M., & Chen, A. (2018). Studies on antiviral and immunoregulation activity of low molecular weight fucoidan from *Laminaria japonica*. *Journal of Ocean University of China*, 17(3), 705–711. <https://doi.org/10.1007/s11802-018-3794-1>
- Tang, C. H. (2020). Globular proteins as soft particles for stabilizing emulsions: Concepts and strategies. *Food Hydrocolloids*, 103, Article 105664. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105664>
- Tomori, M., Nagamine, T., Miyamoto, T., & Iha, M. (2019). Evaluation of the immunomodulatory effects of fucoidan derived from *Cladosiphon okamuranus* Tokida in mice. *Marine Drugs*, 17(10), Article 547. <https://doi.org/10.3390/md17100547>
- Torabi, P., Hamdami, N., & Keramat, J. (2022). Investigation on total phenolic content, antioxidant activity, and emulsifying capacity of sodium alginate from *Nizimuddiniana zanardini* during microwave-assisted extraction; optimization and statistical modeling. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(2), 1549–1558. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01255-4>
- Wang, Y., Xing, M., Cao, Q., Ji, A., Liang, H., & Song S. (2019). Biological activities of fucoidan and the factors mediating its therapeutic effects: A review of recent studies. *Marine Drugs*, 17(3), Article 183. <https://doi.org/10.3390/md17030183>
- Wang, Z., Huang, Y., Wang, M., Wu, G., Geng, T., Zhao, Y., & Wu, A. (2016). Macroporous calcium alginate aerogel as sorbent for Pb<sup>2+</sup> removal from water media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(5), 3185–3192. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.06.032>
- Wani, T. A., Masoodi, F. A., Akhter, R., Akram, T., Gani, A., & Shabir, N. (2022). Nanoencapsulation of hydroxytyrosol in chitosan crosslinked with sodium bisulfate tandem ultrasonication: Techno-characterization, release and antiproliferative properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 82, Article 105900. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105900>
- Wu, S. Y., Parasuraman, V., Arunagiri, V., Gunaseelan, S., Chou, H. Y., Anbazhagan, R., & Prasad, R. (2020). Radioprotective effect of self-assembled low molecular weight Fucoidan-Chitosan nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 579, Article 119161. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119161>
- Xu, Y. T., Yang, T., Liu, L. L., & Tang, C. H. (2020). One-step fabrication of multifunctional high internal phase pickering emulsion gels solely stabilized by a softer globular protein nanoparticle: S-Ovalbumin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 580, 515–527. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.054>

- Zamani, S., Malchione, N., Selig, M. J., & Abbaspourrad, A. (2018). Formation of shelf stable Pickering high internal phase emulsions (HIPE) through the inclusion of whey protein microgels. *Food & Function*, 9(2), 982–990. <https://doi.org/10.1039/C7FO01800B>
- Zhang, H., Ling, M. X., Liu, Y. L., Tu, X. L., Wang, F. Y., Li, C. Y., & Sun, W. D. (2013). High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry copper deposits, southeastern China. *The Journal of Geology*, 121(3), 289–305. <https://doi.org/10.1086/669975>
- Zhao, X., Guo, F., Hu, J., Zhang, L., Xue, C., Zhang, Z., & Li, B. (2016). Antithrombotic activity of oral administered low molecular weight fucoidan from *Laminaria japonica*. *Thrombosis Research*, 144, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.thromres.2016.03.008>
- Zou, Y., Guo, J., Yin, S. W., Wang, J. M., & Yang, X. Q. (2015). Pickering emulsion gels prepared by hydrogen-bonded zein/tannic acid complex colloidal particles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(33), 7405–7414. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03113>
- Zvyagintseva, T. N., Usoltseva, R. V., Shevchenko, N. M., Surits, V. V., Imbs, T. I., Malyarenko, O. S., & Ermakova, S. P. (2021). Structural diversity of fucoidans and their radioprotective effect. *Carbohydrate Polymers*, 273, Article 118551. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118551>

## REFERENCES

- Ashokkumar, M. (2015). Applications of ultrasound in food and bioprocessing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 25, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.012>
- Atashrazm, F., Lowenthal, R. M., Woods, G. M., Holloway, A. F., & Dickinson, J. L. (2015). Fucoidan and cancer: A multifunctional molecule with anti-tumor potential. *Marine Drugs*, 13(4), 2327–2346. <https://doi.org/10.3390/md13042327>
- Benslima, A., Sellimi, S., Hamdi, M., Nasri, R., Jridi, M., Cot, D., Li, S., Nasri, M., & Zouari, N. (2021). The brown seaweed *Cystoseira schiffneri* as a source of sodium alginate: Chemical and structural characterization, and antioxidant activities. *Food Bioscience*, 40, Article 100873. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100873>
- Cen, S., Li, Z., Guo, Z., Li, H., Shi, J., Huang, X., Zou, X., & Holmes, M. (2022). 4D printing of a citrus pectin/ $\beta$ -CD Pickering emulsion: a study on temperature induced color transformation. *Additive Manufacturing*, 56, Article 102925. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102925>
- Chen, Q. H., Zheng, J., Xu, Y. T., Yin, S. W., Liu, F., & Tang, C. H. (2018). Surface modification improves fabrication of pickering high internal phase emulsions stabilized by cellulose nanocrystals. *Food Hydrocolloids*, 75, Article 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.005>
- Córdova, B. M., Jacinto, C. R., Alarcón, H., Mejía, I. M., López, R. C., de Oliveira Silva, D., Valderrama, A. C. (2018). Chemical modification of sodium alginate with thiosemicarbazide for the removal of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 2259–2270. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.095>
- Cui, K., Tai, W., Shan, X., Hao, J., Li, G., & Yu, G. (2018). Structural characterization and anti-thrombotic properties of fucoidan from *nemacystus decipiens*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1817–1822. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.079>
- Dhiman, A., & Prabhakar, P. K. (2021). Micronization in food processing: A comprehensive review of mechanistic approach, physicochemical, functional properties and self-stability of micronized food materials. *Journal of Food Engineering*, 292, Article 110248. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110248>
- Gong, J., Wang, S., Wang, J., Feng, W., Peng, H., Tang, J., & Yu, P. S. (2020). Attentional graph convolutional networks for knowledge concept recommendation in moocs in a heterogeneous view. In *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 79–88). <https://doi.org/10.1145/3397271.3401057>
- Sharma, H., Sharma, S., Bajwa, J., Chugh, R., Kumar, D. (2023). Polymeric carriers in probiotic delivery system *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, Article 100301, <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100301>
- Hmelkov, A. B., Zvyagintseva, T. N., Shevchenko, N. M. (2018). Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from brown alga *Fucus evanescens*. Structure and biological activity of the new fucoidan fractions. *Journal of Applied Phycology*, 30(3), 2039–2046. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1342-9>
- Huang, M., Wang, J., & Tan, C. (2021). Tunable high internal phase emulsions stabilized by cross-linking/electrostatic deposition of polysaccharides for delivery of hydrophobic bioactives. *Food Hydrocolloids*, 118, Article 106742. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106742>
- Imbs, T. I., & Ermakova, S. P. (2021). Can Fucoidans of Brown Algae Be Considered as Antioxidants? *Russian Journal of Marine Biology*, 47(3), 157–161. <https://doi.org/10.1134/S1063074021030056>
- Jiao, B., Shi, A., Wang, Q., & Binks, B. P. (2018). High-internal-phase pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications. *Angewandte Chemie*, 130(30), 9418–9422. <https://doi.org/10.1002/ange.201801350>
- Kiani, H., Zhang, Z., Delgado, A., & Sun, D. W. (2011). Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing. *Food Research International*, 44(9), 2915–2921. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.051>

- Koh, H. S. A., Lu, J., & Zhou, W. (2019). Structure characterization and antioxidant activity of fucoidan isolated from *Undaria pinnatifida* grown in New Zealand. *Carbohydrate polymers*, 212, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.040>
- Kolodyńska, D., Gęca, M., Skwarek, E., & Goncharuk, O. (2018). Titania-coated silica alone and modified by sodium alginate as sorbents for heavy metal ions. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), Article 96. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2512-7>
- Krylova, N. V., Ermakova, S. P., Lavrov, V. F., Leneva, I. A., Kompanets, G. G., Iunikhina, O. V., & Zaporozhets, T. S. (2020). The comparative analysis of antiviral activity of native and modified fucoidans from brown algae *Fucus evanescens* in vitro and in vivo. *Marine drugs*, 18(4), Article 224. <https://doi.org/10.3390/md18040224>
- Lee, J., Kim, J., Moon, C., Kim, S. H., Hyun, J. W., Park, J. W., Shin, T. (2008). Radioprotective effects of fucoidan in mice treated with total body irradiation. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 22(12), 1677–1681. <https://doi.org/10.1002/ptr.2562>
- Li, Q., Wu, Y., Fang, R., Lei, C., Li, Y., Li, B., & Luo, X. (2021). Application of Nanocellulose as particle stabilizer in food Pickering emulsion: Scope, Merits and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.027>
- Lin, P., Chen, S., Liao, M., & Wang, W. (2022). Physicochemical Characterization of Fucoidans from *Sargassum henslowianum* C. Agardh and Their Antithrombotic Activity In Vitro. *Marine Drugs*, 20(5), Article 300. <https://doi.org/10.3390/md20050300>
- Marefati, A., Sjöö, M., Timgren, A., Dejmek, P., & Rayner, M. (2015). Fabrication of encapsulated oil powders from starch granule stabilized W/O/W Pickering emulsions by freeze-drying. *Food Hydrocolloids*, 51, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.04.022>
- Mok, T. S., Wu, Y. L., Kudaba, I., Kowalski, D. M., Cho, B. C., Turna, H. Z., & Lu, S. (2019). Pembrolizumab versus chemotherapy for previously untreated, PD-L1-expressing, locally advanced or metastatic non-small-cell lung cancer (KEYNOTE-042): A randomised, open-label, controlled, phase 3 trial. *The Lancet*, 393(10183), 1819–1830. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32409-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32409-7)
- Peng, Y., Song, Y., Wang, Q., Hu, Y., He, Y., Ren, D., & Zhou, H. (2019). In vitro and in vivo immunomodulatory effects of fucoidan compound agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 127, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.197>
- Perrin, E., Bizot, H., Cathala, B., & Capron, I. (2014). Chitin nanocrystals for Pickering high internal phase emulsions. *Biomacromolecules*, 15(10), 3766–3771. <https://doi.org/10.1021/bm5010417>
- Potoroko, I. Yu., Kalinina, I. V., Naumenko, N. V., Fatkullin, R. I., Nenasheva, A. V., Uskova, D. G., Sonawane, S. H., Ivanova, D. G., & Velyamov, M. T. (2018). Sonochemical micronization of taxifolin aimed at improving its bioavailability in drinks for athletes. *Human. Sport. Medicine*, 18(3), 90–100. <https://doi.org/10.14529/hsm180309>
- Ribeiro, E. F., Morell, P., Nicoletti, V. R., Quiles, A., & Hernandez, I. (2021). Protein- and polysaccharide-based particles used for Pickering emulsion stabilisation. *Food Hydrocolloids*, 119, Article 106839. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106839>
- Rui, X., Tan, H., & Yan, Q. (2014). Nanostructured metal sulfides for energy storage. *Nanoscale*, 6(17), 9889–9924. <https://doi.org/10.1039/C4NR03057E>
- Sano, Y. (1999). Antiviral activity of alginate against infection by tobacco mosaic virus. *Carbohydrate Polymers*, 38(2), 183–186. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(98\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00119-2)
- Sellimi, S., Younes, I., Ayed, H. B., Maalej, H., Montero, V., Rinaudo, M., & Nasri, M. (2015). Structural, physicochemical and antioxidant properties of sodium alginate isolated from a Tunisian brown seaweed. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1358–1367. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.016>
- Serrano-Aroca, A., Ferrandis-Montesinos, M., & Wang, R. (2021). Antiviral properties of alginate-based biomaterials: Promising antiviral agents against SARS-CoV-2. *ACS Applied Bio Materials*, 4(8), 5897–5907. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00523>
- Sun, Q. L., Li, Y., Ni, L. Q., Li, Y. X., Cui, Y. S., Jiang, S. L., & Dong, C. X. (2020a). Structural characterization and antiviral activity of two fucoidans from the brown algae *Sargassum henslowianum*. *Carbohydrate Polymers*, 229, Article 115487. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115487>
- Sun, S. H., Chen, Q., Gu, H. J., Yang, G., Wang, Y. X., Huang, X. Y., & Wang, Y. C. (2020b). A mouse model of SARS-CoV-2 infection and pathogenesis. *Cell Host & Microbe*, 28(1), 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2020.05.020>
- Sun, T., Zhang, X., Miao, Y., Zhou, Y., Shi, J., Yan, M., & Chen, A. (2018). Studies on antiviral and immunoregulation activity of low molecular weight fucoidan from *Laminaria japonica*. *Journal of Ocean University of China*, 17(3), 705–711. <https://doi.org/10.1007/s11802-018-3794-1>
- Tang, C. H. (2020). Globular proteins as soft particles for stabilizing emulsions: Concepts and strategies. *Food Hydrocolloids*, 103, Article 105664. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105664>
- Tomori, M., Nagamine, T., Miyamoto, T., & Iha, M. (2019). Evaluation of the immunomodulatory effects of fucoidan derived from *Cladosiphon okamuranus* Tokida in mice. *Marine Drugs*, 17(10), Article 547. <https://doi.org/10.3390/md17100547>
- Torabi, P., Hamdami, N., & Keramat, J. (2022). Investigation on total phenolic content, antioxidant activity, and emulsifying capacity of sodium alginate from *Nizimuddiniana zanardini* during microwave-assisted extraction; optimization and statistical modeling. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(2), 1549–1558. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01255-4>
- Wang, Y., Xing, M., Cao, Q., Ji, A., Liang, H., & Song S. (2019). Biological activities of fucoidan and the factors medi-

- ating its therapeutic effects: A review of recent studies. *Marine Drugs*, 17(3), Article 183. <https://doi.org/10.3390/md17030183>
- Wang, Z., Huang, Y., Wang, M., Wu, G., Geng, T., Zhao, Y., & Wu, A. (2016). Macroporous calcium alginate aerogel as sorbent for Pb<sup>2+</sup> removal from water media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 3185–3192. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.06.032>
- Wani, T. A., Masoodi, F. A., Akhter, R., Akram, T., Gani, A., & Shabir, N. (2022). Nanoencapsulation of hydroxytyrosol in chitosan crosslinked with sodium bisulfate tandem ultrasonication: Techno-characterization, release and antiproliferative properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 82, Article 105900. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasonch.2021.105900>
- Wu, S. Y., Parasuraman, V., Arunagiri, V., Gunaseelan, S., Chou, H. Y., Anbazhagan, R., & Prasad, R. (2020). Radioprotective effect of self-assembled low molecular weight Fucoidan-Chitosan nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 579, Article 119161. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119161>
- Xu, Y. T., Yang, T., Liu, L. L., & Tang, C. H. (2020). One-step fabrication of multifunctional high internal phase pickering emulsion gels solely stabilized by a softer globular protein nanoparticle: S-Ovalbumin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 580, 515–527. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.054>
- Zamani, S., Malchione, N., Selig, M. J., & Abbaspourrad, A. (2018). Formation of shelf stable Pickering high internal phase emulsions (HIPE) through the inclusion of whey protein microgels. *Food & Function*, 9(2), 982–990. <https://doi.org/10.1039/C7FO01800B>
- Zhang, H., Ling, M. X., Liu, Y. L., Tu, X. L., Wang, F. Y., Li, C. Y., & Sun, W. D. (2013). High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry copper deposits, southeastern China. *The Journal of Geology*, 121(3), 289–305. <https://doi.org/10.1086/669975>
- Zhao, X., Guo, F., Hu, J., Zhang, L., Xue, C., Zhang, Z., & Li, B. (2016). Antithrombotic activity of oral administered low molecular weight fucoidan from *Laminaria Japonica*. *Thrombosis Research*, 144, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.thromres.2016.03.008>
- Zou, Y., Guo, J., Yin, S. W., Wang, J. M., & Yang, X. Q. (2015). Pickering emulsion gels prepared by hydrogen-bonded zein/tannic acid complex colloidal particles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(33), 7405–7414. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03113>
- Zvyagintseva, T. N., Usoltseva, R. V., Shevchenko, N. M., Surits, V. V., Imbs, T. I., Malyarenko, O. S., & Ermakova, S. P. (2021). Structural diversity of fucoidans and their radioprotective effect. *Carbohydrate Polymers*, 273, Article 118551. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118551>