

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385)

EDN: [SVWRIV](https://www.edn.ru/SVWRIV)

УДК 639.64:57.081.22



Иммуномоделирующие свойства полисахаридов макроводорослей Балтийского моря

Е.В. Ульрих¹, О.А. Новожилов¹, С.В. Агафонова¹, Е.С. Землякова¹,
Н.Ю. Ключко¹, А.Х. Обрегон², А.В. Качанова¹, О.С. Федорова¹

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Российская Федерация

²Перуанский технологический университет, Лима, Перу

Аннотация

Обоснование. Физиологические свойства биологически активных полисахаридов макроводорослей чрезвычайно разнообразны. Ценными биологически активными свойствами полисахаридов макроводорослей является противовоспалительные и иммуномоделирующие свойства.

Цель. Изучить иммуномоделирующую способность полисахаридов макроводорослей Балтийского моря – *Fucus vesiculosus* и *Furcellaria lumbrifera*.

Материалы и методы. Пробы водорослей *Furcellaria lumbricalis* и *Fucus vesiculosus* отбирались на побережье Балтийского моря в период с 01 по 30 апреля 2025 года (Куршский залив, Калининградская область, Россия), сушилась на воздухе, досушивалась при 40°C в сушильном шкафу и измельчались.

Экстракция проводилась с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. После завершения экстракции горячий раствор отфильтровывался под вакуумом через марлю. К жидкой фазе экстракта добавлялся ледяной изопропиловый спирт для осаждения полисахаридов, которые высушивались в сушильном шкафу.

Противовоспалительные свойства эндо- и экзополисахаридов определялись методом, основанном на применении твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА) с применением иммуноферментного анализатора Mindray MR-96A. Противовоспалительные свойства оценивались с применением цитокинов ИЛ-1β и ФНО-α. Для определения содержания ИЛ-1β использовалось на лунку для каждого образца по 20 мкл супернатанта и 80 мкл питательной среды RPMI-1640, для

определения содержания ФНО- α использовалось на лунку для каждого образца по 100 мкл супернатанта.

Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета прикладных программ Statistica 7.0 (StatSoft, USA).

Результаты. Определено, что полисахариды Фукус-Г, Фукус-М, Фукус-Д и Фукус-Б, выделенные из макроводорослей *F. vesiculosus*, ингибировали продукцию провоспалительного цитокина ИЛ-1 β в сравнении с отрицательным контролем. Пониженное содержание цитокинов ИЛ-1 β для *F. vesiculosus* составило 350,74 $\pm$ 14,49, 402,69 $\pm$ 14,22, 402,12 $\pm$ 21,48 и 401,78 $\pm$ 19,82 пг/мл соответственно. Наибольшее количество цитокинов для *F. vesiculosus* продуцировали образцы полисахаридов Фукус-А, Фукус-Э и Фукус-В (420,36 $\pm$ 21,01, 414,69 $\pm$ 20,80 и 415,78 $\pm$ 19,95 пг/мл, соответственно). Для макроводоросли *F. lumbrifera* ингибировали выработку цитокинов образцы полисахаридов Фурус-Г, Фурус-Э, Фурус-М, Фурус-В и Фурус-Б (402,26 $\pm$ 19,77, 403,03 $\pm$ 21,14, 409,65 $\pm$ 20,95, 402,65 $\pm$ 20,61 и 401,33 $\pm$ 19,82 пг/мл, соответственно). Установлено, что образцы полисахаридов Фурус-А и Фурус-Д для макроводорослей *F. lumbrifera* продуцируют наибольшее количество цитокинов ИЛ-1 β (419,37 $\pm$ 20,59 и 421,47 $\pm$ 19,82 пг/мл, соответственно). Показано, что изучаемые образцы полисахаридов характеризовались отсутствием статистически значимого ингибирующего или стимулирующего эффекта на выработку цитокина ФНО- α в реакционной среде моноклеарами после их добавления в концентрации 20 мкг/мл. Установлено, что в присутствии образцов Фукус-А и Фукус-Э, Фурус-А и Фурус-Э содержание цитокинов ФНО- α наибольшее и составило 36,87 $\pm$ 1,89, 32,81 $\pm$ 1,94, 35,19 $\pm$ 0,15 и 32,51 $\pm$ 1,91 пг/мл, соответственно. Содержание же цитокина ФНО- α при использовании образцов полисахаридов Фукус-М и Фукус-В практически не изменилось по сравнению с отрицательным контролем.

Заключение. Таким образом выявлено, что образцы полисахаридов, выделенных из макроводорослей, они проявляют противовоспалительный эффект и могут быть рекомендованы в качестве ингредиента или фармацевтической субстанции в производстве биологически активных добавок или лекарственных препаратов иммуномодулирующего и противовоспалительного действия.

Ключевые слова: макроводоросли; иммуномодулирующие свойства; провоспалительные цитокины; полисахариды; экстрагент

Для цитирования. Ульрих, Е. В., Новожилов, О. А., Агафонова, С. В., Землякова, Е. С., Ключко, Н. Ю., Обрегон, А.Х., & Качанова, А. В., Федорова О. С. (2026). Иммуномоделирующие свойства полисахаридов макроводорослей Балтийского моря. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 524–540. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385>

Immunomodulatory properties of polysaccharides from Baltic Sea macroalgae

E.V. Ulrikh¹, O.A. Novozhilov¹, S.V. Agafonova¹, E.S. Zemlyakova¹,
N.Yu. Klyuchko¹, A.J. Obregón-La Rosa², A.V. Kachanova¹, O.S. Fedorova¹

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

²Peruvian Technological University, Lima, Peru

Abstract

Background. The physiological properties of biologically active polysaccharides in macroalgae are extremely diverse. Macroalgae polysaccharides have valuable anti-inflammatory and immunomodulating properties.

Purpose. To study the immunomodulating ability of the polysaccharides of macroalgae of the Baltic Sea – *Fucus vesiculosus* и *Furcellaria lumbrifera*.

Materials and methods. Samples of algae *Furcellaria lumbricalis* and *Fucus vesiculosus* were collected on the coast of the Baltic Sea in the period from April 01 to April 30, 2025 (Curonian Bay, Kaliningrad region, Russia), air-dried, finished drying at 40°C in a desiccator, and crushed.

The extraction was performed using dilute mineral acids, an alkali, and water. After extraction was complete, the hot solution was filtered under vacuum through gauze. Then, ice-cold isopropyl alcohol was added to the liquid phase of the extract to precipitate the polysaccharides, which were subsequently dried in a desiccator.

The anti-inflammatory properties of endo- and exopolysaccharides were determined using a solid-phase enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) method with a Mindray MR-96A ELISA analyzer. The anti-inflammatory properties were evaluated using the cytokines IL-1 β and TNF- α . Twenty microliters of supernatant and 80 μ L of RPMI-1640 nutrient medium were used per well for each sample to determine IL-1 β content. To determine TNF- α content, 100 microliters of supernatant were used per well for each sample.

The Statistica 7.0 application program package (StatSoft, USA) was used for statistical processing of the data.

Results. Polysaccharides Fucus-G, Fucus-M, Fucus-D, and Fucus-B, which were isolated from the macroalgae *F. vesiculosus*, were found to inhibit the production of the proinflammatory cytokine IL-1 β compared to the negative control. The IL-1 β content decreased to 350.74 $\pm$ 14.49, 402.69 $\pm$ 14.22, 402.12 $\pm$ 21.48, and 401.78 $\pm$ 19.82 pg/mL, respectively, for *F. vesiculosus*. The highest amount of cytokines for *F. vesiculosus* was produced by Fucus-A, Fucus-E and Fucus-B polysaccharide samples (420.36 $\pm$ 21.01, 414.69 $\pm$ 20.80 and 415.78 $\pm$ 19.95 pg/mL, respectively). For the macroalgae *F. lumbrifera*,

the polysaccharide samples Furcus-G, Furcus-E, Furcus-M, Furcus-B and Furcus-B inhibited cytokine production (402.26 ± 19.77 , 403.03 ± 21.14 , 409.65 ± 20.95 , 402.65 ± 20.61 and 401.33 ± 19.82 pg/mL, respectively). It was found that Furz-A and Furz-D polysaccharide samples for *F. lumbrifera* macroinvertebrates produced the highest amount of IL-1 β cytokines (419.37 ± 20.59 and 421.47 ± 19.82 pg/mL, respectively). It was shown that the studied samples of polysaccharides were characterized by the absence of statistically significant inhibitory or stimulating effect on the production of cytokine TNF- α in the reaction medium by monocleares after their addition at a concentration of 20 μ g/ml. It was found that in the presence of Fukus-A and Fukus-E, Furz-A and Furz-E samples the content of cytokine TNF- α was the highest and amounted to 36.87 ± 1.89 , 32.81 ± 1.94 , 35.19 ± 0.15 and 32.51 ± 1.91 pg/mL, respectively. The content of TNF- α cytokine when using Fucus-M and Fucus-B polysaccharide samples practically did not change in comparison with the negative control.

Conclusion. Thus, it is revealed that polysaccharide samples isolated from macroalgae exhibit an anti-inflammatory effect. These samples can be recommended as ingredients or pharmaceutical substances for the production of dietary supplements or immunomodulatory and anti-inflammatory drugs.

Keywords: macroalgae; immunomodulatory properties; proinflammatory cytokines; polysaccharides; extractant

For citation. Ulrikh, E. V., Novozhilov, O. A., Agafonova, S. V., Zemlyakova, E. S., Klyuchko, N. Yu., Obregón-La Rosa, A.J., Kachanova, A. V., & Fedorova, O. S. (2026). Immunomodulatory properties of polysaccharides from Baltic Sea macroalgae. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 524–540. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1385>

Введение

Полисахариды присутствуют во всех живых организмах. Они демонстрируют сложные биохимические структуры, основанные на сочетании гликозидных связей. Полисахариды широко используются в промышленности. В последнее время большое внимание уделяется изучению их биологической активности. Физиологические свойства биологически активных полисахаридов чрезвычайно разнообразны и определяются их структурой. Они играют важную роль в разнообразных микробных сообществах и обеспечивает круговорот углерода и энергии во многих типах клеток, в том числе в клетках макроводорослей [16; 24].

Ежегодное мировое производство макроводорослей оценивается в 100 000–200 000 тонн. Глобальная рыночная стоимость составляет от 0,5 до 5 миллиардов евро. Хотя мировой рынок водорослей, по оценкам, находится

в зачаточном состоянии, он стремительно растет. Основные продуцируемые в промышленности водоросли – *Laminaria* и *Fucales*. Их используют для производства кормов для сельскохозяйственных животных и рыб [17].

Известно, что макроводоросли производят и выделяют в окружающую среду большие количества полисахаридов. Такие полисахариды имеют сложную структуру [2]. Хотя научное сообщество обратило внимание на их биологическую активность, потенциальное использование в качестве гидрогелей в различных отраслях промышленности, недостаточно. Сложность строения ограничивает их исследование [1].

Экзогенные полисахариды, выделяемые макроводорослями, могут либо взаимодействовать с поверхностью клетки, либо выделяться в окружающую среду. [4] Иногда они состоят из внеклеточных полисахаридов, капсульных и сульфатных полисахаридов [5; 6].

У макроводорослей основными этапами экзогенного синтеза полисахаридов являются: синтез с помощью гликозилтрансферазы и полимеризация во внеклеточном пространстве или клеточной мембране [7; 18]. Однако для макроводорослей точный механизм химических взаимодействий при синтезе экзополисахаридов до сих пор не опубликован.

Фенол-серноокислотный метод [9] или хроматографические методы [10; 11] позволяют определить содержание экзогенного полисахарида в водорослевой среде. Для биотехнологических целей должна быть доступна более подробная структурная информация, чтобы установить корреляции между структурой полисахаридов и их биологически активными (противовоспалительными, иммуномодулирующими, противоопухолевыми, противовирусными, противопаразитарными, антиоксидантными, гипогликемическими и гипохолестеринемическими) свойствами.

Благодаря перечисленным свойствам, полисахариды нашли применение в пищевой, нутрицевтической, косметической промышленности, биомедицине и кормопроизводстве.

Цель исследования – изучить иммуномоделирующую способность полисахаридов макроводорослей Балтийского моря – *Fucus vesiculosus* и *Furcellaria lumbrifera*.

Материалы и методы исследования

Методика отбора биомассы водорослей

Пробы водорослей *Furcellaria lumbricalis* и *Fucus vesiculosus* отбирались на побережье Балтийского моря в период с 01 по 30 апреля 2025 года (Куршский залив, Калининградская область, Россия). Отбор образцов про-

извлеклись в период волновой активности, так как именно в этот период на берегу скапливается максимальное количество водорослей *F. lumbricalis* и *F. vesiculosus*. Образцы доставлялись в лабораторию в пластиковых ведрах. После доставки в лабораторию из биомассы удалялись крупные посторонние примеси. В основном, примеси были представлены щепками, полимера, фрагментами животных, листьями. Далее биомасса промывалась водопроводной водой для удаления песка и оставшихся мелких примесей.

Чистая биомасса сушилась на воздухе и досушивалась при 40°C в сушильном шкафу с естественной конвекцией Being серии BO-NL (Being, Шанхай, Китай). Высушенные водоросли хранились в бумажных пакетах в сухом и хорошо проветриваемом помещении. Непосредственно перед анализом водоросли измельчались ножевым лабораторным измельчителем D3V-10 (ООО «Вилитек», Москва, Россия).

Методика выделения полисахаридов из макроводорослей

Экстракцию полисахаридов проводили на установке, оборудованной нагревательным элементом - водяной баней LWB-206A (Daihan Labtech, Сеул, Ю. Корея) и обратным холодильником (ООО «ДВ-эксперт», Москва, Россия).

Экстракцию проводили с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. Для экстракции брали навеску измельченных макроводорослей *F. lumbricalis* и *F. vesiculosus* массой 3.0 г, помещали ее в коническую колбу и добавляли 60 мл раствора щелочи или кислоты [12].

После завершения экстракции горячий раствор отфильтровывали под вакуумом через марлю. К жидкой фазе экстракта добавляли ледяной изопропиловый спирт для осаждения полисахаридов. Соотношение спирта к раствору составляло 1:20.

Осадок повторно отфильтровывали через марлю. Отделенные полисахариды сушили в силиконовой форме в сушильном шкафу с естественной конвекцией Being серии BO-NL (Being, Шанхай, Китай) в течение суток при 60°C до постоянной массы. Массу измеряли гравиметрическим методом. Процесс проводился десятью сериями опытов.

Определение иммуномоделирующих свойств полисахаридов макроводорослей

Противовоспалительные свойства эндо- и экзополисахаридов определяли методом, основанном на применении твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА) с применением иммуноферментного анализатора Mindray MR-96A (Mindray, Китай). Для этого, контрольные и изучаемые образцы эндо- и экзополисахаридов инкубировали в лунках с иммобилизованными моноклональными антителами. Имеющиеся в образцах ци-

токсины связывались с иммобилизованными антителами. Связавшиеся цитокины на следующей стадии взаимодействовали при инкубации с первым конъюгатом (поликлональными антителами к цитокинам человека с биотином). Далее в ходе реакции, связавшиеся конъюгаты взаимодействовали при инкубации со вторым конъюгатом (стрептавидин с пероксидазой хрена). Количество связавшегося второго конъюгата определяли цветной реакцией с использованием субстрата пероксидазы хрена – перекиси водорода и хромогена – тетраметилбензидина. В ходе реакции интенсивность желтого окрашивания пропорциональна концентрации содержащихся в образцах цитокинов. После измерения оптической плотности растворов в лунках при длине волны 450 нм на основании калибровочного графика рассчитывали концентрацию цитокинов в анализируемых образцах.

Противовоспалительные свойства оценивали с применением цитокинов ИЛ-1 β и ФНО- α , так как ранее установлено, что в противовоспалительной активности полисахаридов, экстрагированных из макроводорослей, могут быть задействованы различные механизмы, включая ингибирование ферментов или снижение количества провоспалительных цитокинов [3].

Цитокины ИЛ-1 β и ФНО- α – это ключевые провоспалительные цитокины моноцитов, макрофагов и лимфоцитов. Если добавить к мононуклеарам провоспалительный агент – например, липополисахарид бактериальной стенки, то клетки будут реагировать в первую очередь выбросом именно этих цитокинов, с этого и начинается острая фаза воспаления. Противовоспалительные свойства эндо- и экзополисахаридов, выделенных из макроводорослей оценивали при концентрации 10 и 50 мкг/мл, так как именно при этих концентрациях отсутствует цитотоксический эффект в отношении мононуклеаров.

Для определения содержания ИЛ-1 β брали на лунку для каждого образца по 20 мкл супернатанта и 80 мкл питательной среды RPMI-1640, для определения содержания ФНО- α брали на лунку для каждого образца по 100 мкл супернатанта. Процедуру ИФА проводили согласно протоколу производителей коммерческих наборов.

В качестве положительного контроля использовали клетки, обработанные липополисахаридов, а в качестве отрицательного контроля применяли супернатант стимулированных липополисахаридом мононуклеарных клеток в отсутствии полисахаридов.

Статистический анализ

Результаты измерений были представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения. Достоверность различий между выборочными дисперсиями оценивали с помощью критерия Краскела-Уоллиса

для независимых выборок. Наличие статистически значимой разницы принималось при условии $p < 0.05$. Полученные данные обрабатывали с помощью программного обеспечения SPSS Statistics (IBM Corporation, 28.0.1, Армонке, Нью-Йорк, USA); графики построены в Excel (Microsoft Corporation, Microsoft Office 2016, Редмонд, Вашингтон, USA).

Результаты исследования

Результаты изучения противовоспалительных свойств макроводорослей при концентрации полисахаридов 20 мкг/мл представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Противовоспалительные свойства полисахаридов, выделенных из макроводорослей

Table 1. Anti-inflammatory properties of polysaccharides isolated from macroalgae

Название макроводорослей			
<i>F. vesiculosus</i>			
Экстрагент	Шифр образца	Содержание цитокинов, пг/мл	
		ИЛ-1 β	ФНО- α
Ацетонитрил	Фукус-А	420,36 $\pm$ 21,01	36,87 $\pm$ 1,89
Гексан	Фукус-Г	350,74 $\pm$ 14,49	31,52 $\pm$ 1,87
Этанол	Фукус-Э	414,69 $\pm$ 20,80	32,81 $\pm$ 1,94
Метанол	Фукус-М	402,69 $\pm$ 14,22	30,14 $\pm$ 1,80
Диэтиловый эфир	Фукус-Д	402,12 $\pm$ 21,48	31,72 $\pm$ 1,88
Вода	Фукус-В	415,78 $\pm$ 19,95	30,40 $\pm$ 1,92
Бутанол	Фукус-Б	401,78 $\pm$ 19,82	31,83 $\pm$ 1,89
<i>F. lumbrifera</i>			
Ацетонитрил	Фуцц-А	421,47 $\pm$ 19,82	35,19 $\pm$ 0,15
Гексан	Фуцц-Г	402,26 $\pm$ 19,77	31,96 $\pm$ 1,88
Этанол	Фуцц-Э	403,03 $\pm$ 21,14	32,51 $\pm$ 1,91
Метанол	Фуцц-М	409,65 $\pm$ 20,95	31,68 $\pm$ 1,87
Диэтиловый эфир	Фуцц-Д	419,37 $\pm$ 20,59	31,25 $\pm$ 1,86
Вода	Фуцц-В	402,65 $\pm$ 20,61	31,40 $\pm$ 1,92
Бутанол	Фуцц-Б	401,33 $\pm$ 19,82	31,72 $\pm$ 1,88
Положительный контроль	-	402,65 $\pm$ 20,61	29,41 $\pm$ 1,58
Отрицательный контроль	-	409,15 $\pm$ 20,58	30,78 $\pm$ 1,88

Обсуждение

Анализ результатов (таблица 1) изучения противовоспалительных свойств эндополисахаридов макроводорослей, позволил выявить, что не

все изучаемые образцы обладали искомой биологической активностью. Определено, что полисахариды Фукус-Г, Фукус-М, Фукус-Д и Фукус-Б, выделенные из макроводорослей *F. vesiculosus*, ингибировали продукцию провоспалительного цитокина ИЛ-1 β в сравнении с отрицательным контролем. Пониженное содержание цитокинов ИЛ-1 β для *F. vesiculosus* составило $350,74 \pm 14,49$, $402,69 \pm 14,22$, $402,12 \pm 21,48$ и $401,78 \pm 19,82$ пг/мл соответственно. Наибольшее количество цитокинов для *F. vesiculosus* продуцировали образцы полисахаридов Фукус-А, Фукус-Э и Фукус-В ($420,36 \pm 21,01$, $414,69 \pm 20,80$ и $415,78 \pm 19,95$ пг/мл, соответственно).

Для макроводоросли *F. lumbrifera* ингибировали выработку цитокинов образцы полисахаридов Фурц-Г, Фурц-Э, Фурц-М, Фурц-В и Фурц-Б ($402,26 \pm 19,77$, $403,03 \pm 21,14$, $409,65 \pm 20,95$, $402,65 \pm 20,61$ и $401,33 \pm 19,82$ пг/мл, соответственно). Установлено, что образцы полисахаридов Фурц-А и Фурц-Д для макроводорослей *F. lumbrifera* продуцируют наибольшее количество цитокинов ИЛ-1 β ($419,37 \pm 20,59$ и $421,47 \pm 19,82$ пг/мл, соответственно).

Показано, что изучаемые образцы полисахаридов характеризовались отсутствием статистически значимого ингибирующего или стимулирующего эффекта на выработку цитокина ФНО- α в реакционной среде моноклерами после их добавления в концентрации 20 мкг/мл. Установлено, что в присутствии образцов Фукус-А и Фукус-Э, Фурц-А и Фурц-Э содержание цитокинов ФНО- α наибольшее и составило $36,87 \pm 1,89$, $32,81 \pm 1,94$, $35,19 \pm 0,15$ и $32,51 \pm 1,91$ пг/мл, соответственно. Содержание же цитокина ФНО- α при использовании образцов полисахаридов Фукус-М и Фукус-В практически не изменилось по сравнению с отрицательным контролем.

Выявлено, что при использовании в качестве противовоспалительного агента образцов полисахаридов, выделенных из макроводорослей, увеличилось количество провоспалительных цитокинов ИЛ-1 β и ФНО- α . Они проявляют противовоспалительный эффект и могут быть рекомендованы в качестве ингредиента или фармацевтической субстанции в производстве биологически активных добавок или лекарственных препаратов иммуномодулирующего и противовоспалительного действия.

Так как воспаление - это естественная физиологическая реакция иммунной системы на повреждение тканей, которая возникает, когда организм человека пытается бороться с различными патогенами, токсичными соединениями и поврежденными клетками [14]. Эти триггеры могут вызывать острые или хронические воспалительные реакции в различных органах и вызывать повреждение тканей или некоторые иммунопосре-

дованные заболевания [19]. Макрофаги как иммунные клетки, массово продуцирующие медиаторы воспаления, включая простагландин E2 и оксид азота, играют важную роль в воспалении [14]. Воспаление включает две острую и хроническую фазы. В острой фазе происходит накопление жидкости, повышение кровотока и проницаемости сосудов, увеличение количества лейкоцитов и медиаторов воспаления, тогда как хроническая фаза связана с развитием специфических гуморальных и клеточных иммунных реакций [15].

В традиционной медицине многие соединения природного происхождения используются экспериментально для лечения заболеваний и раневых повреждений [25]. В последние годы морские ресурсы получили признание благодаря разнообразию содержащихся в них биологически активных соединений, которые становятся важными ингредиентами средств по уходу за кожей из-за их сильных противовоспалительных свойств, а также безопасности и низкого риска при их использовании [23]. Потребители все чаще ищут экологически чистую косметику, содержащую меньшее количество синтетических ингредиентов [22]. Широкий спектр биотехнологических применений установлен для полисахаридов водных организмов, особенно водорослей. Высокое содержание противовоспалительных молекул полисахаридов сделало их особенно привлекательными [20]. Таким образом, экстракты водорослей, содержащих полисахариды, имеют потенциал для использования в изготовлении фармацевтических препаратов, косметики, нутрицевтиков, биомедицинских и пищевых продуктов [8].

Экзогенные полисахариды, полученные из макроводорослей, образуют слой биоминералов на поверхности почвы, что приводит к образованию органической почвенной корки, которая, в свою очередь, способствует образованию органических почв. Они также важны в экологическом контексте. Они могут предотвратить инфекции, переносимые макроводорослями [13]. Известно, что макроводоросли является важным производителем экзогенных полисахаридов, но данный процесс недостаточно изучен.

Хотя более ранние изобретения вакцин обеспечивали приобретенный иммунитет, недавние усилия по разработке противовоспалительных препаратов значительно возросли из-за возникновения или (повторного) появления инфекционных заболеваний. Нейхейс и др. предположили, что это может быть связано с тем, что вирусные частицы могут спонтанно манипулировать своим генетическим составом при каждом столкновении со стратегией лечения, что приводит к лекарственной устойчивости [21],

поэтому существует потребность в противовоспалительных молекулах из источников, не загрязненных вирусом.

Заключение

Определено, что наибольшее количество цитокинов для *F. vesiculosus* продуцировали образцы полисахаридов Фукус-А, Фукус-Э и Фукус-В ($420,36 \pm 21,01$, $414,69 \pm 20,80$ и $415,78 \pm 19,95$ пг/мл, соответственно). Образцы полисахаридов Фурц-А и Фурц-Д для макроводорослей *F. lumbrifera* продуцируют наибольшее количество цитокинов ИЛ-1 β ($419,37 \pm 20,59$ и $421,47 \pm 19,82$ пг/мл, соответственно).

Показано, что в присутствии образцов Фукус-А и Фукус-Э, Фурц-А и Фурц-Э содержание цитокинов ФНО- α наибольшее и составило $36,87 \pm 1,89$, $32,81 \pm 1,94$, $35,19 \pm 0,15$ и $32,51 \pm 1,91$ пг/мл, соответственно. Содержание же цитокина ФНО- α при использовании образцов полисахаридов Фукус-М и Фукус-В практически не изменилось по сравнению с отрицательным контролем.

Выявлено, что при использовании в качестве противовоспалительного агента образцов полисахаридов, выделенных из макроводорослей, увеличилось количество провоспалительных цитокинов ИЛ-1 β и ФНО- α . Они проявляют противовоспалительный эффект и могут быть рекомендованы в качестве ингредиента или фармацевтической субстанции в производстве биологически активных добавок или лекарственных препаратов иммуномодулирующего и противовоспалительного действия.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО «КГТУ», осуществляемых за счет средств федерального бюджета (бюджетный цикл 2025-2027, регистрационный номер карты ЕГИСУ НИОКТР 1124072300009-1 от 23.07.2024 г.), соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Список литературы / References

1. Bica, A., Barbu-Tudoran, L., Druga, B., et al. (2012). *Desmodesmus communis* (Chlorophyta) from Romanian freshwaters: Coenobial morphology and molecular

- taxonomy based on the ITS2 of new isolates. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 17, 16–28.
2. Catarino, M. D., Silva, A. M., & Cardoso, S. M. (2018). Phycochemical constituents and biological activities of *Fucus* spp. *Marine Drugs*, 16(8), 249. <https://doi.org/10.3390/md16080249>. EDN: <https://elibrary.ru/XYSCOL>
 3. Chakraborty, M., Miao, C., McDonald, A., et al. (2012). Concomitant extraction of bio-oil and value-added polysaccharides from *Chlorella sorokiniana* using a unique sequential hydrothermal extraction technology. *Fuel*, 95, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.055>.
 4. Chen, Y., Liu, X., & Wu, L., et al. (2018). Physicochemical characterization of polysaccharides from *Chlorella pyrenoidosa* and its anti-ageing effects in *Drosophila melanogaster*. *Carbohydrate Polymers*, 185, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.077>.
 5. Chen, Y., Lin, Z., Li, Q., et al. (2015). The anti-allergic activity of polyphenol extracted from five marine algae. *Journal of Ocean University of China*, 14(4), 681–684. <https://doi.org/10.1007/s11802-015-2601-5>.
 6. Chen, Y. X., Liu, X. Y., Xiao, Z., et al. (2016). Antioxidant activities of polysaccharides obtained from *Chlorella pyrenoidosa* via different ethanol concentrations. *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, 505–509. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.086>.
 7. Cikoš, A. M., Jokić, S., Šubarić, D., et al. (2018). Overview on the application of modern methods for the extraction of bioactive compounds from marine macroalgae. *Marine Drugs*, 16(10), 348. <https://doi.org/10.3390/md16100348>.
 8. Davoodbasha, M., Edachery, B., Nooruddin, T., et al. (2018). An evidence of C16 fatty acid methyl esters extracted from microalga for effective anti-microbial and antioxidant property. *Microbial Pathogenesis*, 115, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.12.049>. EDN: <https://elibrary.ru/VEAWHB>
 9. de Jesus, C. S., de Jesus Assis, D., Rodriguez, M. B., et al. (2019). Pilot-scale isolation and characterization of extracellular polymeric substances (EPS) from cell-free medium of *Spirulina* sp. LEB-18 cultures under outdoor conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 1106–1114. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.016>.
 10. de Moraes, M. G., Vaz, B. D. S., de Moraes, E. G., et al. (2015). Biologically active metabolites synthesized by microalgae. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/835761>. EDN: <https://elibrary.ru/UOOQCX>
 11. Deamici, K. M., de Moraes, M. G., Santos, L. O., et al. (2021). Static magnetic fields effects on polysaccharides production by different microalgae strains. *Applied Sciences*, 11(11), 5299. <https://doi.org/10.3390/app11115299>. EDN: <https://elibrary.ru/UAUBRN>

12. Holden, N. M., Neill, A. M., Stout, J. C., et al. (2022). Biocircularity: A framework to define sustainable, circular bioeconomy. *Circular Economy and Sustainability*, 3, 77–91. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00180-y>. EDN: <https://elibrary.ru/WOGNUD>
13. Kadam, S., Tiwari, B., & O'Donnell, C. J. (2013). Application of novel extraction technologies for bioactives from marine algae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 4667–4675. <https://doi.org/10.1021/jf400819p>. EDN: <https://elibrary.ru/RJYJCX>
14. Kim, S. K., & Wijesekara, I. (2011). Anticoagulant effect of marine algae. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 64, pp. 235–244). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387669-0.00018-1>. EDN: <https://elibrary.ru/PGZDTL>
15. Lahaye, M., & Robic, A. (2007). Structure and function properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*, 8, 1765–1774. <https://doi.org/10.1021/bm061185q>.
16. Leandro, A., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. (2019). Diverse applications of marine macroalgae. *Marine Drugs*, 18(1), 17. <https://doi.org/10.3390/md18010017>. EDN: <https://elibrary.ru/CJYVHK>
17. Lind, L., Eckstein, R. L., & Relyea, R. A. (2022). Direct and indirect effects of climate change on distribution and community composition of macrophytes in lentic systems. *Biological Reviews*, 97(4), 1677–1690. <https://doi.org/10.1111/brv.12858>. EDN: <https://elibrary.ru/UPJANZ>
18. Lourenço, C., Fraga-Corral, M., Jimenez-Lopez, C., et al. (2021). Biological action mechanisms of fucoxanthin extracted from algae for application in food and cosmetic industries. *Trends in Food Science & Technology*, 117, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.012>. EDN: <https://elibrary.ru/IAHHVH>
19. Matsubara, K. (2005). Recent advances in marine algal anticoagulants. *Cardiovascular & Hematological Agents in Medicinal Chemistry*, 2, 13–19. <https://doi.org/10.2174/1568016043477314>.
20. Montalvo, G. E. B., Thomaz-Soccol, V., Vandenberghe, L. P. S., et al. (2019). Arthrospira maxima OF15 biomass cultivation at laboratory and pilot scale from sugar-cane vinasse for potential biological new peptides production. *Bioresource Technology*, 273, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.081>.
21. Nijhuis, M., van Maarseveen, N. M., & Boucher, C. A. (2008). Antiviral resistance and impact on viral replication capacity: Evolution of viruses under antiviral pressure occurs in three phases. In *Handbook of Experimental Pharmacology* (pp. 299–320). https://doi.org/10.1007/978-3-540-79086-0_11. EDN: <https://elibrary.ru/WQWVFX>
22. Patel, H. M., Rastogi, R. P., Trivedi, U., et al. (2018). Structural characterization and antioxidant potential of phycocyanin from the cyanobacterium Geitlerinema sp. H8DM. *Algal Research*, 32, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.04.024>.
23. Sathishkumar, R. S., Sundaramanickam, A., Srinath, R., et al. (2019). Green syn-

- thesis of silver nanoparticles by bloom-forming marine microalgae *Trichodesmium erythraeum* and its applications in antioxidant, drug-resistant bacteria, and cytotoxicity activity. *Journal of Saudi Chemical Society*, 23(8), 1180–1191. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2019.07.008>.
24. Silva, A., Silva, S. A., Carpena, M., et al. (2020). Macroalgae as a source of valuable antimicrobial compounds: Extraction and applications. *Antibiotics*, 9(10), 642. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9100642>. EDN: <https://elibrary.ru/DBEUKK>
25. Tamala, J. K., Maramag, E. I., Simeon, K. A., et al. (2022). A bibliometric analysis of sustainable oil and gas production research using VOSviewer. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100437>. EDN: <https://elibrary.ru/AWCXSV>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Ульрих Елена Викторовна, д-р техн. наук, доцент, директор Химико-аналитического ресурсного центра
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
elen.ulrich@mail.ru

Новожилов Олег Анатольевич, канд. биол. наук, доцент, директор института рыболовства и аквакультуры
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
oleg.novozhilov@klgtu.ru

Агафонова Светлана Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
svetlana.agafonova@klgtu.ru*

Землякова Евгения Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
evgeniya.zemljakova@klgtu.ru*

Ключко Наталия Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
natalya.kluchko@klgtu.ru*

Обрегон Антонио Хосе, доктор наук, профессор
*Перуанский технологический университет
ул. 28 июля, 15046, Лима, Перу
antonio-38@mail.ru*

Качанова Анжелика Валерьевна, аспирант кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
asunyaykina54@gmail.com*

Федорова Олеся Сергеевна, магистрант кафедры пищевой биотехнологии
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»
пр. Советский, 1, г. Калининград, 236022, Российская Федерация
olesya.fedorova@klgtu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHOR

Elena V. Ulrikh, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Chemical-Analytical Resource Center
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
elen.ulrich@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-7277>
ResearcherID: I-3095-2017
Scopus Author ID: 56764211200

Oleg A. Novozhilov, PhD in Biology, Associate Professor, Director of the Institute of Fisheries and Aquaculture
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
oleg.novozhilov@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9776-4845>
ResearcherID: NKQ-0552-2025
Scopus Author ID: 56711851000

Svetlana V. Agafonova, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
svetlana.agafonova@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5992-414X>
ResearcherID: 2505-4522
Scopus Author ID: 57222610902

Evgeniya S. Zemlyakova, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
evgeniya.zemljakova@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-3914>
ResearcherID: AAF-6701-2019
Scopus Author ID: 57224414427

Natalia Yu. Klyuchko, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology

Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
natalya.kluchko@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6708-9674>
ResearcherID: AAE-8960-2019
Scopus Author ID: 57222610783

Antonio Jose Obregón-La Rosa, Doctor of Science, Professor
Peruvian Technological University
28, July str., Lima, 15046 Peru
antonio-38@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1385-7682>

Anzhelika V. Kachanova, Postgraduate Student of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
asunyaykina54@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1290-0577>
ResearcherID: 7230-8280

Olesya S. Fedorova, Master's student of the Department of Food Biotechnology
Kaliningrad State Technical University
1, Sovetsky Ave., Kaliningrad, 236022, Russian Federation
olesya.fedorova@klgtu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8226-1408>
ResearcherID: NHQ-0115-2025

Поступила 06.06.2025

После рецензирования 01.08.2025

Принята 18.10.2025

Received 06.06.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 18.10.2025