



## Экстракция и характеристика альгината натрия из бурых водорослей *Fucus vesiculosus*

Д.С. Колотова✉, Е.В. Боровинская, В.В. Бордиян, С.Р. Деркач

Мурманский арктический университет, Мурманск, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью работы являлось исследование влияния условий получения альгината натрия из бурых водорослей *Fucus vesiculosus* на выход, молекулярную массу, физико-химические и реологические характеристики полисахарида, а также определение содержания токсичных элементов в полученном продукте для изучения возможности его применения в качестве пищевой добавки. Варьировали время (1 и 5 ч) и температуру (25, 60 и 80 °С) экстракции, а также тип осадителя ( $C_2H_5OH$  и  $HCl$ ). Определение средневязкостной молекулярной массы альгината натрия проводилось методом капиллярной вискозиметрии. Идентификация образцов осуществлялась методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Содержание токсичных элементов в водорослях и альгинате натрия определялось с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Реологические свойства водных растворов альгината натрия изучались методом сдвиговой реологии. Аппроксимация реологических кривых проводилась с использованием моделей Кросса и Оствальда – де Вилля. Установлено, что увеличение времени и температуры экстракции приводит к увеличению выхода продукта, молекулярной массы и реологических характеристик, однако при этом ухудшаются органолептические показатели. Образец, полученный при температуре и времени экстракции 25 °С и 1 ч соответственно, пятикратной промывке и замене стадии центрифугирования на фильтрацию, характеризовался наиболее высокими значениями молекулярной массы (592 кДа) и реологических характеристик. При этом по своим свойствам полученный образец превосходил коммерческий. Показано, что альгинат натрия может применяться в качестве пищевой добавки, поскольку содержание токсичных элементов не превышает предельно допустимых концентраций.

**Ключевые слова:** *Fucus vesiculosus*, бурые водоросли, альгинат натрия, реология, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье

**Благодарности.** Исследование выполнено на базе научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» Мурманского арктического университета, созданной при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FENR-2024-0001, соглашение № 075-03-2024-024/1 от 15.02.24).

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-73-01233.

**Для цитирования:** Колотова Д.С., Боровинская Е.В., Бордиян В.В., Деркач С.Р. Экстракция и характеристика альгината натрия из бурых водорослей *Fucus vesiculosus* // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 4. С. 548–558. DOI: 10.21285/achb.1007. EDN: AEHZAR.

## Extraction and characterization of sodium alginate from the brown alga *Fucus vesiculosus*

Daria S. Kolotova✉, Ekaterina V. Borovinskaya,  
Vlada V. Bordiyan, Svetlana R. Derkach

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russian Federation

**Abstract.** The study aimed to examine the effects of conditions for obtaining sodium alginate from the brown alga *Fucus vesiculosus* on the yield, molecular weight, and physicochemical and rheological properties of the polysaccharide, as well as to determine the levels of toxic elements in the obtained product to assess its potential use as a food additive. The extraction was performed under different time (1 and 5 hours) and temperature (25, 60, and 80 °C) conditions, with the use of different precipitants (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH and HCl). The viscosity-average molecular weight of sodium alginate was determined via capillary viscometry. The identification of samples was performed using Fourier transform infrared spectroscopy. The levels of toxic elements in the alga and sodium alginate were determined through inductively coupled plasma mass spectrometry. The rheological properties of aqueous sodium alginate solutions were studied using a method of shear rheology. The rheological curves were fitted with the Cross and Ostwald – de Waele models. A longer extraction time and a higher extraction temperature were found to increase product yield, molecular weight, and rheological properties, while lowering organoleptic properties. The sample obtained at extraction temperature and time of 25 °C and 1 hour, respectively (with the washing stage repeated five times and the centrifugation stage replaced with filtration), was characterized by the highest values of molecular weight (592 kDa) and rheological properties. Also, in terms of its properties, the obtained sample was superior to the commercial sample. It was shown that since the levels of toxic elements do not exceed the maximum permissible concentrations, sodium alginate can be used as a food additive.

**Keywords:** *Fucus vesiculosus*, brown algae, sodium alginate, rheology, Fourier transform infrared spectroscopy

**Acknowledgment.** The study was carried out at the Research Laboratory of Chemistry and Technology of Marine Bioresources (Murmansk Arctic University) established with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FENR-2024-0001, agreement no. 075-03-2024-024/1 dated 15.02.24).

**Funding.** The Russian Science Foundation supported this work (project no. 23-73-01233).

**For citation:** Kolotova D.S., Borovinskaya E.V., Bordiyan V.V., Derkach S.R. Extraction and characterization of sodium alginate from the brown alga *Fucus vesiculosus*. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(4):548-558. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.10007. EDN: AEHZAR.

### ВВЕДЕНИЕ

Альгинат натрия является солью альгиновой кислоты. Она представляет собой линейный сополимер, состоящий из 1–4 связанных остатков β-D-маннуроносовой и α-L-гулуриносовой кислот, которые случайным образом распределены вдоль углеводных цепей [1]. Данные урановые кислоты образуют однородные блоки гулуриносовой или маннуроносовой кислоты, а также цепи с чередующимися блоками гулуриносовой и маннуроносовой кислоты [2]. Морские бурые водоросли являются единственным промышленным источником альгината натрия, который содержится в клеточных стенках и межклеточном матриксе бурых водорослей [3].

Альгинат натрия является биосовместимым, нетоксичным и биоразлагаемым полимером, а его водные растворы характеризуются высокой вязкостью, благодаря чему он широко применяется в пищевой, косметической, биомедицинской и фармацевтической отраслях промышленности [4]. В частности, в фармацевтике альгинат натрия применяется при создании капсул и микросфер для доставки лекарственных и

терапевтических средств [5–7]. В медицине альгинат применяют для создания гемостатических и противовоспалительных пленок [8]. В косметических средствах он применяется в качестве структурообразователя и эмульгатора для улучшения свойств косметических продуктов [9], а также в качестве основного компонента для создания косметических средств на основе гидрогелей [10].

В пищевой промышленности альгинат применяют в качестве загустителя, эмульгатора, структурообразователя, заменителя жира, стабилизирующего, связывающего и функционального компонента [11]. Одним из важных направлений использования альгината натрия является создание пищевых пленок, поскольку добавление полисахарида значительно улучшает барьерные, механические и термические свойства, тем самым препятствуя микробному заражению продукции и окислительным процессам [12].

Ключевым фактором при определении физико-химических и технологических свойств, а также областей применения альгината натрия является его молекулярная масса,

которая, в свою очередь, зависит от таких факторов, как место и условия произрастания, тип водорослей, период сбора, а также условий получения полисахарида [13]. Процесс получения альгината натрия подробно описан в обзорных работах [11, 13]. Стандартный процесс экстракции альгинатов основан на термической обработке [14]. Повышение температуры обработки может привести к увеличению выхода полисахарида, однако при использовании высоких температур в сочетании с длительным временем экстракции может снижаться вязкость полученного продукта. Как правило, температура экстракции варьируется от комнатной температуры до 50 °C [15]. В работе [16] показано, что наиболее высокий выход альгинатов был получен при 40 °C, однако в работах [17, 18] было показано, что наибольший выход наблюдается при температурах 90–100 °C.

Важную роль играет также время экстракции. В работе [17] было показано, что существует прямая корреляция между временем экстракции и выходом продукта. Максимальный выход был получен за 3 ч. Однако в работе [19] было отмечено, что увеличение времени экстракции и температуры способствует получению альгинатов с меньшими значениями молекулярной массы и вязкости.

Заключительным этапом получения альгинатов является их осаждение и очистка. В работе [20] рассмотрено три способа осаждения альгината натрия: этанолом, соляной кислотой и хлоридом кальция. Осаждение этанолом способствовало увеличению выхода альгината, в то время как соляная кислота и хлорид кальция способствовали снижению молекулярной массы полученных образцов.

Научная литература, посвященная вопросам экстракции альгината натрия из водорослей различного происхождения, содержит разрозненные и порой противоречивые сведения о взаимосвязи условий экстракции и свойств альгината натрия. По этой причине существует необходимость в установлении корреляции между условиями получения альгината натрия, его молекулярной массой и реологическими характеристиками, которые, в свою очередь, определяют его структурные и органолептические свойства, а также потенциал применения в различных отраслях промышленности. Целью данной работы является исследование влияния условий экстракции и осаждения альгината натрия из бурых водорослей *Fucus vesiculosus*, произрастающих на побережье Кольского полуострова, на выход, молекулярно-массовые и реологические характеристики полисахарида. Исследованы показатели безопасности полученного продукта для применения в качестве пищевой добавки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве сырья для получения альгината натрия использовали бурые водоросли *F. vesiculosus* (фукус пузырчатый) (рис. 1, а), собранные на побережье губы Малая Питкуля (Кандалакшский район, Мурманская область, Россия) (рис. 1, б). Дата сбора – 25 июня 2023 года. Свежесобранные водоросли очищали от песка, моллюсков и прочих примесей, промывали в проточной воде и высушивали на воздухе при температуре 25±2 °C до постоянной массы в течение 3 суток, исключая воздействие солнечного света. Высушенные водоросли измельчали на лабораторной мельнице в порошок и

хранили в герметичной таре при комнатной температуре. Содержание влаги в высушенных водорослях составило 12,4±0,5%, содержание золы – 1,3±0,1%, содержание альгиновой кислоты – 35,4±1,8%.



**Рис. 1.** Внешний вид бурых водорослей *Fucus vesiculosus* (а) и район сбора (б)

**Fig. 1.** Appearance of brown algae *Fucus vesiculosus* (а) and collection area (б)

Альгинат натрия получали по методике, описанной в источнике [18], с некоторыми модификациями. Для удаления фенольных соединений и бурого пигмента высушенные и измельченные водоросли обрабатывали раствором формальдегида с концентрацией 2% об. (соотношение водорослей и формальдегида составляет 1:4 по массе) при постоянном перемешивании в течение 24 ч при 25±2 °C. Обработанные водоросли промывали дистиллированной водой 3 раза и центрифугировали в течение 15 мин со скоростью 3500 об/мин при температуре 25±2 °C для отделения жидкости. Далее проводили обработку водорослей 0,2 М раствором HCl (соотношение водорослей и HCl составляло 1:4 по массе) при постоянном помешивании в течение 2 ч при 25 °C. Обработанные водоросли промывали дистиллированной водой до нейтрального значения pH и центрифугировали в течение 15 мин со скоростью 3500 об/мин при температуре 25 °C.

Обработанные водоросли смешивали с 2%-м раствором Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> в соотношении 1:4 по массе и проводили экстракцию при различных условиях. Для изучения влияния времени получения альгината натрия проводили экстракцию в течение 1 и 5 ч при температуре 25 °C. Для изучения влияния температуры получения альгината натрия на выход и свойства продукта экстракцию проводили в течение 1 ч при различных температурах: 25, 60 и 80 °C при постоянном перемешивании. По окончании экстракции полученную смесь фильтровали через слой марлевой ткани, осадок от фильтрации направляли на утилизацию. Для полного удаления мелких частиц водорослей полученный раствор центрифугировали в течение 15 мин со скоростью 3500 об/мин при температуре 25±2 °C.

Далее проводили осаждение альгината натрия из полученного раствора с использованием растворов HCl и NaHCO<sub>3</sub>, а также C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH:

1. Для осаждения альгината натрия с использованием раствора HCl и NaHCO<sub>3</sub> к фильтрату по каплям добавляли 18%-й раствор HCl до значений pH = 1–3, в результате чего наблюдалось образование неоднородного геля. Полученный гель фильтровали через слой капроновой ткани. К полученному гелю добавляли порошок NaHCO<sub>3</sub> до pH = 7. Полученный раствор сушили в лиофильной сушилке FreeZone (Labconco, США) при температуре минус 50 °C и остаточном давлении 2,4–2,6 Па.

2. Для осаждения альгината натрия с использованием раствора  $C_2H_5OH$  к фильтрату добавляли 95%-й раствор  $C_2H_5OH$  в соотношении 1:1 при постоянном перемешивании. В результате наблюдалось осаждение альгината натрия в виде тонких волокон. Полученный альгинат натрия отфильтровывали через слой капроновой ткани, после чего сушили в лиофильной сушилке FreeZone (Labconco, США) при температуре минус 50 °C и остаточном давлении 2,4–2,6 Па.

Для сокращения длительности технологического процесса стадию центрифугирования водорослей после обесцвечивания заменили на промывание водорослей дистиллированной водой в количестве 5 раз.

Выход альгината натрия  $X$ , %, рассчитывали по формуле

$$X = \frac{m}{M} \times 100\%, \quad (1)$$

в которой  $m$  – масса высушенного альгината натрия, г;  $M$  – масса высушенных водорослей, г.

Оценку органолептических показателей (цвета и внешнего вида) проводили в соответствии с описанием, приведенным в ГОСТ 33310-2015<sup>1</sup>, согласно которому альгинат натрия представляет собой желтовато-белый с сероватым оттенком волокнистый порошок, гранулы или пластинки.

Содержание влаги и золы определяли в соответствии с ГОСТ 33331-2015<sup>2</sup>.

Определение средневязкостной молекулярной массы полученных образцов альгината натрия проводили методом капиллярной вискозиметрии при температуре 20 °C. В качестве растворителя использовали 0,1 М раствор NaCl. Значение молекулярной массы рассчитывали с использованием уравнения Марка – Куна – Хаувинка:

$$[\eta] = K \times M_{\eta}^{\alpha} \quad (2)$$

где  $[\eta]$  – характеристическая вязкость;  $M_{\eta}$  – средневязкостная молекулярная масса;  $K$  и  $\alpha$  – константы, зависящие от природы растворителя и полимера:  $K = 2 \times 10^{-5}$ ,  $\alpha = 1$  [21].

Идентификацию образцов альгината натрия проводили методом инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии. Спектры пропускания регистрировали с использованием ИК-спектрометра с преобразованием Фурье IRTracer-100 (Shimadzu, Япония) в диапазоне частот 4000–800  $cm^{-1}$  с разрешением 4  $cm^{-1}$  (количество сканирований – 250) в таблетках KBr.

Содержание токсичных элементов в водорослях и альгинате натрия определяли с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Elan-9000 DRC-e (Perkin Elmer Inc., США).

Реологические свойства водных растворов альгината натрия исследовали с использованием модульного компактного реометра MCR 302 (Anton Paar, Австрия), оснащенного измерительной системой «конус – плоскость». Диаметр конуса составлял 50 мм, угол между основанием конуса и плоскостью – 1°, рабочее расстояние между конусом и плоскостью – 0,1 мм. Растворы альгината

натрия готовили путем растворения навески в дистиллированной воде при постоянном перемешивании с предварительным набуханием в воде в течение 5 ч при  $25 \pm 2$  °C. Концентрация растворов альгината натрия составила 3% масс. Измерения проводили при температуре  $23,00 \pm 0,01$  °C в двух режимах деформации: 1) режиме контролируемой скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  в диапазоне от 0,01 до 100  $s^{-1}$ ; 2) режиме периодических колебаний в области линейной вязкоупругости при постоянном значении амплитуды  $w$  1% в диапазоне значений частоты деформации  $\omega$  от 0,1 до 100  $s^{-1}$ .

В качестве образца сравнения использовали коммерческий образец альгината натрия из бурых водорослей A2033 (Sigma, Великобритания) со среднемассовой молекулярной массой 507 кДа.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной задачей в технологии альгината натрия является получение очищенного продукта без цвета и запаха с высокими значениями молекулярной массы и вязкости водных растворов [22]. Для изучения влияния условий экстракции на физико-химические свойства и выход альгината натрия были получены образцы полисахарида при различных значениях времени (1 и 5 ч) и температуры (25, 60 и 80 °C) экстракции, а также типах осадителя (растворы  $C_2H_5OH$  и HCl). Условное обозначение образцов приведено в табл. 1.

**Таблица 1.** Обозначение образцов альгината натрия в зависимости от условий экстракции

**Table 1.** Designation of sodium alginate samples depending on extraction conditions

Образец	Условия экстракции		
	Время, ч	Температура, °C	Осадитель
SA-1-25Et1	1	25	$C_2H_5OH$
SA-1-25Et	1	25	$C_2H_5OH$
SA-5-25Et	5	25	$C_2H_5OH$
SA-1-60Et	1	60	$C_2H_5OH$
SA-1-80Et	1	80	$C_2H_5OH$
SA-1-25Ac	1	25	HCl
SA-5-25Ac	5	25	HCl

Внешний вид полученных образцов альгината натрия приведен на рис. 2. Образцы, полученные при температуре и времени экстракции 25 °C и 1 ч соответственно (осадитель – раствор  $C_2H_5OH$ ), отвечают требованиям, предъявляемым к пищевым альгинатам, и являются наиболее приближенными по цвету к коммерческому образцу альгината. Увеличение времени с 1 до 5 ч и температуры экстракции от 25 до 80 °C приводит к ухудшению органолептических характеристик альгината натрия и увеличению интенсивности цвета от светло-бежевого до коричневого. Использование в качестве осадителя раствора HCl также способствует ухудшению органолептических показателей.

<sup>1</sup>ГОСТ 33310-2015. Добавки пищевые. Загустители пищевых продуктов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

<sup>2</sup>ГОСТ 33331-2015. Водоросли, травы морские и продукция из них. Методы определения массовой доли воды, золы и посторонних примесей. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.



**Рис. 2.** Внешний вид образцов альгината натрия после сушки

**Fig. 2.** Appearance of sodium alginate samples after drying

Исследованы физико-химические свойства полученных образцов альгината натрия (табл. 2). Показано, что при увеличении температуры экстракции от 25 до 80 °С выход и молекулярная масса альгината натрия увеличиваются с 3,7 до 19,7% и со 129 до 212 кДа соответственно. Увеличение времени экстракции от 1 до 5 ч не приводит к росту выхода продукта, однако незначительно увеличивается значение молекулярной массы от 129 до 167 кДа. Содержание золы и влаги в образцах, для осаждения которых применялся этанол, примерно одинаково и составляет около 30%. Использование в качестве осадителя раствора HCl приводит к существенному снижению молекулярной массы образцов и росту минеральной составляющей, что может быть связано с разрушением полимерной цепи под действием кислоты и образованием солей в процессе осаждения.

Получены ИК-спектры для образцов альгината натрия (рис. 3). Они демонстрируют широкую полосу пропускания в диапазоне волновых чисел 3427–3383 см<sup>-1</sup>,

соответствующую валентным колебаниям гидроксильных групп. Полосы поглощения в области 1614–1618 и 1413–1418 см<sup>-1</sup> отвечают валентным колебаниям асимметричных и симметричных карбоксильных групп. Кроме того, наблюдается наличие полос поглощения в области 1300 см<sup>-1</sup> (валентные колебания C-O), 1082–1032 см<sup>-1</sup> (колебания C-O и CO-C групп в маннуроновой и гулуриновой единицах соответственно) и 816–858 см<sup>-1</sup> (колебания C-O групп в α-конфигурации гулуриновой единицы) [23]. Необходимо отметить, что спектры полученных образцов альгината натрия соответствуют спектру коммерческого образца Sigma A2033.

Таким образом было показано, что наибольшие значения выхода продукта и молекулярной массы могут быть получены при температуре экстракции 80 °С (осадитель – раствор C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), однако при этом значительно ухудшаются органолептические свойства, что существенно ограничивает области применения альгината натрия. Наиболее близким по физико-химическим и реологическим свойствам к коммерческому

**Таблица 2.** Физико-химические свойства образцов альгината натрия

**Table 2.** Physicochemical properties of sodium alginate samples

Образец	Показатель			
	Выход, %	Влага, %	Зола, %	Средневязкостная молекулярная масса, кДа
SA-1-25Et1	7,5±0,6	14,5±0,5	33,3±0,1	592±9
SA-1-25Et	3,7±0,5	15,8±0,4	29,3±0,1	129±7
SA-5-25Et	3,6±0,7	15,9±0,7	27,1±0,2	167±6
SA-1-60Et	8,5±0,5	13,0±0,5	29,8±0,1	176±8
SA-1-80Et	19,7±0,6	9,3±0,6	30,3±0,1	212±6
SA-1-25Ac	8,0±0,4	16,4±0,4	69,6±0,2	31±9
SA-5-25Ac	3,6±0,5	12,4±0,5	52,2±0,1	57±5

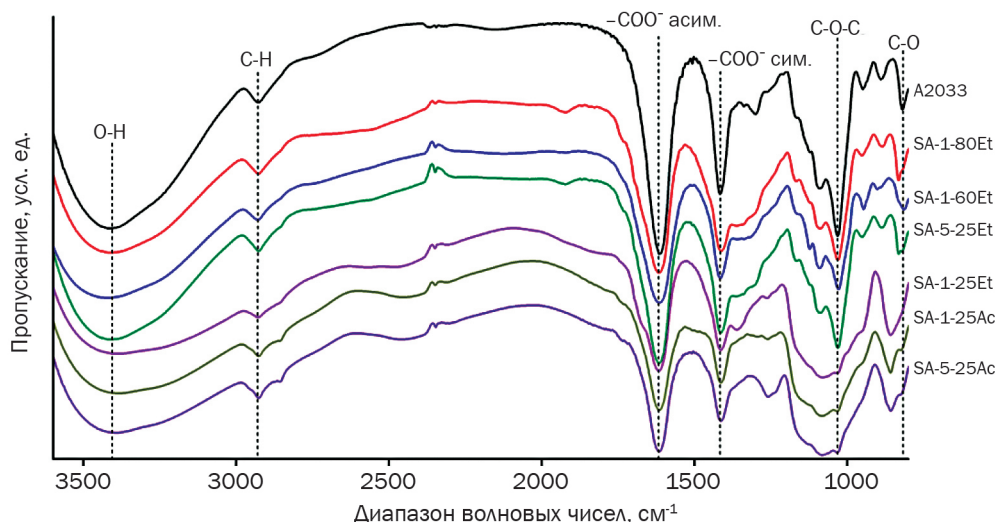


Рис. 3. Инфракрасные спектры образцов альгината натрия

Fig. 3. Infrared spectra of sodium alginate samples

образцу является образец SA-1-25Et, полученный при 25 °С в течение 1 ч.

Также было показано, что увеличение числа промывок с 3 до 5 и замена стадии центрифугирования водорослей на обычную фильтрацию после обработки на этапе обесцвечивания приводят к значительному увеличению молекулярной массы альгината натрия (592 кДа) и к увеличению выхода с 3,7 до 7,5% (см. табл. 2, образец SA-1-25Et1). При этом внешний вид продукта сопоставим с коммерческим образцом (см. рис. 2). Таким образом, данный образец является наиболее перспективным для применения в области пищевых технологий.

Для определения соответствия альгината натрия требованиям безопасности пищевых и комплексных пищевых добавок определено содержание токсичных элементов в водорослях *F. vesiculosus* и образце альгината натрия SA-1-25Et1. Результаты испытаний представлены в табл. 3. Превышение содержания мышьяка в водорослях обусловлено особенностями санитарно-гигиенического состояния Белого моря, а также способностью бурых водорослей аккумулировать металлы вследствие высокого содержания полисахаридов [24]. Однако предварительная обработка сырья, а также многократная промывка и обработка биомассы в процессе экстракции позволяют снизить содержание мышьяка в альгинате натрия до безопасных значений. Содержание тяжелых металлов в образце альгината натрия не превышает предельно допустимых концентраций, установленных техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 029/2012<sup>3</sup>.

Для качественной оценки полученных образцов альгината натрия были исследованы реологические свойства водных растворов полисахарида с концентрацией 3% масс. Наиболее важными реологическими характеристиками являются текучесть, вязкость и вязкопластичные свойства, поскольку они определяют качество продукции, а также необходимы для определения технологических параметров производства [25].

Таблица 3. Содержание токсичных элементов в сырье и альгинате натрия

Table 3. Content of toxic elements in raw materials and sodium alginate

Элемент	Предельно допустимая концентрация	Содержание элемента, мг/кг	
		в <i>Fucus vesiculosus</i>	в образце SA-1-25Et1
Ртуть	1,0	менее 0,05	0,13
Кадмий	1,0	менее 0,10	менее 0,10
Свинец	5,0	2,58	0,17
Мышьяк	3,0	11,10	0,52

На рис. 4, а представлены зависимости вязкости от скорости сдвига для водных растворов альгината натрия. Вязкость растворов закономерно увеличивается по мере роста значений молекулярной массы (см. табл. 2). При этом наибольшими значениями вязкости характеризуется образец SA-1-25Et1, полученный при температуре 25 °С в течение 1 ч. Судя по форме зависимостей, представленных на рис. 3, а, водные растворы альгината натрия представляют собой неньютоновские жидкости. При этом существует некоторая критическая скорость сдвига, при которой наблюдается существование ньютоновского плато. Для аппроксимации реологических кривых на рис. 4, а использовали модель Кросса (3), параметры аппроксимации приведены в табл. 4:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\alpha \dot{\gamma})^n}, \quad (3)$$

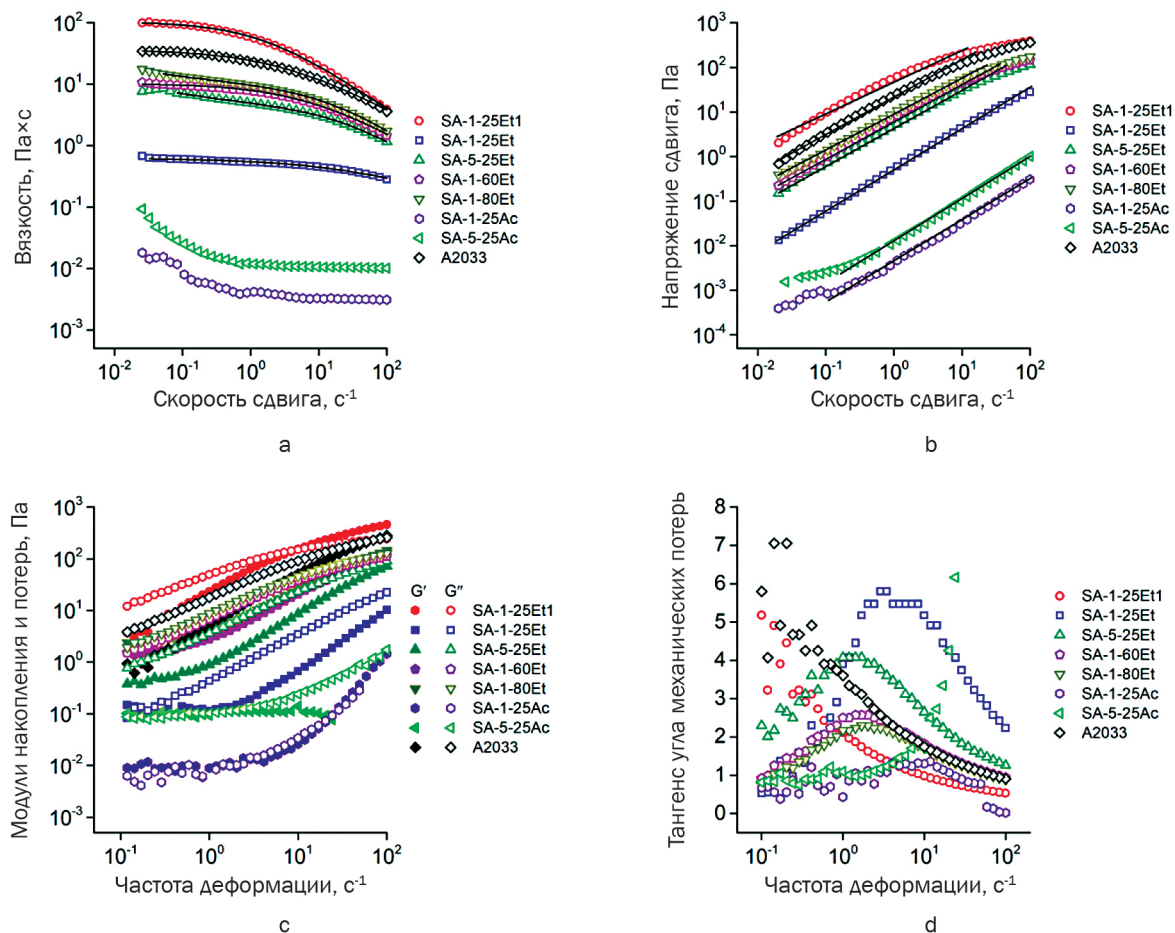
где  $\eta$  – вязкость, Па·с;  $\eta_0$  – ньютоновская вязкость, Па·с;  $\eta_{\infty}$  – предельная вязкость, Па·с;  $\alpha$  – характеристическое время, связанное с разрывом связей в структуре жидкости, с;  $n$  – индекс течения;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>.

<sup>3</sup>Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 029/2012. Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств. Принят 20.07.2012 г. 308 с.

Как видно из табл. 4, значения ньютоновской и предельной вязкостей, а также характеристического времени увеличиваются по мере увеличения температуры и времени экстракции с 25 до 80 °С и с 1 до 5 ч соответственно. Наибольшие значения параметров, рассчитанных по уравнению (3), наблюдаются для образца SA-1-25Et1, который характеризуется более высоким значением молекулярной массы. Для образцов

с низкой вязкостью SA-1-25Ac и SA-5-25Ac, осажденных с использованием раствора HCl, уравнение Кросса не применимо.

На рис. 4, б представлены кривые течения водных растворов альгината натрия. Видно, что напряжение сдвига увеличивается по мере увеличения молекулярной массы альгината натрия за счет увеличения длины молекулярной цепи и внутреннего трения. Кривые течения



**Рис. 4.** Зависимости вязкости (а) и напряжения сдвига (б) от скорости сдвига; зависимости модулей накопления и потерь (с) и тангенса угла механических потерь (д) от частоты деформации ( $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

**Fig. 4.** Dependences of viscosity (a) and shear stress (b) on the shear rate; dependence of the storage moduli and loss module (c) and tangent of the angle of mechanical losses (d) on the deformation frequency ( $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

**Таблица 4.** Параметры аппроксимации

**Table 4.** Approximation parameters

Образец	Модель Кросса					Модель Оствальда – де Вилля		
	$\alpha$ , с	$n$	$\eta_0$ , Па·с	$\eta_{\infty}$ , Па·с	$R^2$	$k$	$n$	$R^2$
SA-1-25Et1	0,68	0,76	103,83	$4,62 \times 10^{-7}$	0,999	59,77	0,79	0,999
SA-1-25Et	0,01	0,44	0,63	$3,34 \times 10^{-8}$	0,993	0,54	0,94	0,999
SA-5-25Et	0,33	0,49	8,16	$1,38 \times 10^{-7}$	0,960	4,87	0,84	0,999
SA-1-60Et	0,15	0,64	10,27	$1,75 \times 10^{-7}$	0,995	7,64	0,86	0,999
SA-1-80Et	0,25	0,60	14,44	$2,06 \times 10^{-7}$	0,990	9,55	0,83	0,999
SA-1-25Ac	–	–	–	–	–	0,01	0,97	0,999
SA-5-25Ac	–	–	–	–	–	0,02	0,98	0,999
A2033	0,33	0,61	36,52	$4,31 \times 10^{-7}$	0,999	23,22	0,82	0,999

**Примечание.**  $\alpha$  – характеристическое время;  $n$  – индекс течения;  $\eta_0$  – ньютоновская вязкость;  $\eta_{\infty}$  – предельная вязкость;  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $k$  – коэффициент консистенции;  $n$  – индекс течения.

были аппроксимированы с использованием модели Оствальда – де Вилля (степенной модели) (4), параметры аппроксимации приведены в табл. 4:

$$\sigma = k \times \dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – напряжение сдвига, Па;  $k$  – коэффициент консистенции, численно равный вязкости при единичном градиенте скорости, Па·с<sup>*n*</sup>;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>–1</sup>;  $n$  – индекс течения, который определяет степень выраженности неньютоновского поведения системы.

Водные растворы альгината натрия представляют собой псевдопластичные жидкости, поскольку значение индекса течения  $n < 1$ . Индекс течения уменьшается с ростом молекулярной массы альгината натрия, в то время как коэффициент консистенции увеличивается. Это связано с тем, что с ростом молекулярной массы полисахарида увеличивается сопротивление цепей трению вследствие образования межмолекулярных зацеплений [26].

На рис. 4, с приведены частотные зависимости динамических модулей (накопления  $G'$  и потерь  $G''$ ) для растворов альгината натрия. Видно, что значения динамических модулей растут по мере увеличения частоты деформации во всем исследуемом диапазоне, при этом значения  $G''$  несколько превосходят значения  $G'$ , особенно в области низких частот, что характерно для жидкообразного поведения материалов. Образец SA-1-25Et1 характеризуется максимальными значениями динамических модулей, которые превосходят аналогичные значения коммерческого образца Sigma.

Факт того, что значения тангенса угла динамических механических потерь ( $\tan \delta = G''/G'$ ) для всех исследо-

ванных водных растворов альгината натрия больше или близки к единице, также указывает на преимущественно вязкое поведение растворов (рис. 4, d). Для образцов SA-1-25Et1 и A2033 наблюдается снижение значения  $\tan \delta$  во всем диапазоне частот. Для остальных образцов, за исключением SA-5-25Ac, изменение данного показателя проходит через максимум. Такое поведение может быть связано с различиями во внутримолекулярных взаимодействиях, а также во взаимодействии полимера с растворителем при различных условиях сдвига.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние условий экстракции и осаждения альгината натрия из бурых водорослей *F. vesiculosus* на выход, молекулярно-массовые и реологические характеристики полисахарида. Показано, что образец SA-1-25Et1, полученный при температуре и времени экстракции 25 °С и 1 ч соответственно, пятикратной промывке и замене стадии центрифугирования на фильтрацию, характеризуется наиболее высокими значениями молекулярной массы (592 кДа) и реологических характеристик. При этом по технологическим характеристикам полученный образец превосходит коммерческий. Отмечено также, что альгинат натрия может применяться в качестве пищевой добавки, поскольку содержание токсичных элементов не превышает установленных предельно допустимых концентраций. Таким образом, альгинат натрия SA-1-25Et1 может применяться в пищевой промышленности в качестве структурообразователя, загустителя и стабилизатора.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Abka-Khajouei R., Tounsi L., Shahabi N., Patel A.K., Abdelkafi S., Michaud, P. Structures, properties and applications of alginates // *Marine Drugs*. 2022. Vol. 20, no. 6. P. 364. DOI: 10.3390/md20060364.
2. Makarova A.O., Derkach S.R., Khair T., Kazantseva M.A., Zuev Y.F., Zueva O.S. Ion-induced polysaccharide gelation: peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations // *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 5. P. 1243. DOI: 10.3390/polym15051243.
3. Łabowska M.B., Michalak I., Detyna J. Methods of extraction, physicochemical properties of alginates and their applications in biomedical field – a review // *Open Chemistry*. 2019. Vol. 17, no. 1. P. 738–762. DOI: 10.1515/chem-2019-0077.
4. Cattelan G., Guerrero Gerbolés A., Foresti R., Pramstaller P.P., Rossini A., Miragoli M., et al. Alginate formulations: current developments in the race for hydrogel-based cardiac regeneration // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 414. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00414.
5. Nezamdoost-Sani N., Khaledabad M.A., Amiri S., Khaneghah A.M. Alginate and derivatives hydrogels in encapsulation of probiotic bacteria: an updated review // *Food Bioscience*. 2023. Vol. 52. P. 102433. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102433.
6. Strobel S.A., Knowles L., Nitin N., Scher H.B., Jeoh T. Comparative technoeconomic process analysis of industrial-scale microencapsulation of bioactives in cross-linked alginate // *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 266. P. 109695. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109695.
7. Bennacef C., Desobry-Banon S., Probst L., Desobry S. Optimization of core-shell capsules properties (Olive oil/alginate) obtained by dripping coextrusion process // *LWT*. 2022. Vol. 167. P. 113879. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113879.
8. Sharma A., Verma C., Singh P., Mukhopadhyay S., Gupta A., Gupta B. Alginate based biomaterials for hemostatic applications: innovations and developments // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 264. P. 130771. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130771.
9. Solovieva E.V., Teterina A.Yu., Klein O.I., Komlev V.S., Alekseev A.A., Panteleyev A.A. Sodium alginate-based composites as a collagen substitute for skin bioengineering // *Biomedical Materials*. 2021. Vol. 16. P. 015002. DOI: 10.1088/1748-605X/abb524.
10. Верещагин А.А., Морозова Е.А. Химия и технология наполненных гидрогелей для создания альгинатных косметических масок (обзор) // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020. N 5. С. 12–31. EDN: JSDDDDQ.
11. Bojorges H., López-Rubio A., Martínez-Abad A., Fabras M.J. Overview of alginate extraction processes: impact on alginate molecular structure and techno-functional properties // *Trends in Food Science & Technology*. 2023. Vol. 140. P. 104142. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.104142.
12. Nath P.C., Sharma R., Debnath S., Sharma M., Inbaraj B.S., Dikkala P.K., et al. Recent trends in cellulose-based biodegradable polymers for smart food packaging industry // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 253. P. 127524. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127524.

**13.** Saji S., Hebden A., Goswami P., Du C. A brief review on the development of alginate extraction process and its sustainability // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 9. P. 5181. DOI: 10.3390/su14095181.

**14.** Silva M., Gomes F., Oliveira F., Morais S., Delerue-Matos C. Microwave-assisted alginate extraction from Portuguese *Saccorhiza polyschides* – influence of acid pretreatment // *International Journal of Chemical, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. 2015. Vol. 9, no. 1. P. 30–33.

**15.** Chee S.-Y., Wong P.-K., Wong C.-L. Extraction and characterisation of alginate from brown seaweeds (*Fucales*, *Phaeophyceae*) collected from Port Dickson, Peninsular Malaysia // *Journal of Applied Phycology*. 2011. Vol. 23. P. 191–196. DOI: 10.1007/s10811-010-9533-7.

**16.** Fertah M., Belfkira A., Taourirte M., Brouillette F. Extraction and characterization of sodium alginate from Moroccan *Laminaria digitata* brown seaweed // *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 10. P. S3707–S3714. DOI: 10.1016/j.arabjch.2014.05.003.

**17.** Mazumder A., Holdt S.L., De Francisci D., Alvarado-Morales M., Mishra H.N., Angelidaki I. Extraction of alginate from *Sargassum muticum*: process optimization and study of its functional activities // *Journal of Applied Phycology*. 2016. Vol. 28. P. 3625–3634. DOI: 10.1007/s10811-016-0872-x.

**18.** Hernandez-Carmona G., McHugh D.J., López-Gutiérrez F. Pilot plant scale extraction of alginates from *Macrocystis pyrifera*. 2. Studies on extraction conditions and methods of separating the alkaline-insoluble residue // *Journal of Applied Phycology*. 1999. Vol. 11. P. 493–502. DOI: 10.1023/A:1008114709681.

**19.** Truus K., Vaheer M., Taure I. Algal biomass from *Fucus vesiculosus* (*Phaeophyta*): investigation of the mineral and alginate components // *Proceedings of the Estonian*

*Academy of Sciences. Chemistry*. 2001. Vol. 50, no. 2. P. 95–103. DOI: 10.3176/chem.2001.2.04.

**20.** Gomez C.G., Perez Lambrecht M.V., Lozano J.E., Rinaudo M., Villar M.A. Influence of the extraction-purification conditions on final properties of alginates obtained from brown algae (*Macrocystis pyrifera*) // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2009. Vol. 44, no. 4. P. 365–371. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2009.02.005.

**21.** Fourest E., Volesky B. Alginate properties and heavy metal biosorption by marine algae // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1997. Vol. 67. P. 215–226. DOI: 10.1007/BF02788799.

**22.** Akbar M., Yaqoob A., Ahmad A., Luque R. Sodium alginate: an overview // *Sodium Alginate-Based Nanomaterials for Wastewater Treatment* / eds A. Ahmad, I. Ahmad, T. Kamal, A.M. Asiri, S. Tabassum. Elsevier, 2023. P. 1–17. DOI: 10.1016/B978-0-12-823551-5.00012-4.

**23.** Sartori C., Finch D.S., Ralph B., Gilding K. Determination of the cation content of alginate thin films by FTIR spectroscopy // *Polymer*. 1997. Vol. 38, no. 1. P. 43–51. DOI: 10.1016/S0032-3861(96)00458-2.

**24.** Подкорытова А.В., Вафина Л.Х., Муравьева Е.А., Шарина З.Н. Санитарно-гигиеническая характеристика бурых водорослей Белого и Баренцева морей // *Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. 2009. N 4. С. 33–39. EDN: KYGTPZ.

**25.** Ma J., Lin Y., Chen X., Zhao B., Zhang J. Flow behavior, thixotropy and dynamical viscoelasticity of sodium alginate aqueous solutions // *Food Hydrocolloids*. 2014. Vol. 38. P. 119–128. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.11.016.

**26.** Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Rheology: concepts, methods, and applications*. ChemTec Publishing, 2012. 473 p. DOI: 10.1016/C2011-0-04626-4.

## REFERENCES

**1.** Abka-Khajouei R., Tounsi L., Shahabi N., Patel A.K., Abdelkafi S., Michaud, P. Structures, properties and applications of alginates. *Marine Drugs*. 2022;20(6):364. DOI: 10.3390/md20060364.

**2.** Makarova A.O., Derkach S.R., Khair T., Kazantseva M.A., Zuev Y.F., Zueva O.S. Ion-induced polysaccharide gelation: peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations. *Polymers*. 2023;15(5):1243. DOI: 10.3390/polym15051243.

**3.** Łabowska M.B., Michalak I., Detyna J. Methods of extraction, physicochemical properties of alginates and their applications in biomedical field – a review. *Open Chemistry*. 2019;17(1):738–762. DOI: 10.1515/chem-2019-0077.

**4.** Cattelan G., Guerrero Gerbolés A., Foresti R., Pramstaller P.P., Rossini A., Miragoli M., et al. Alginate formulations: current developments in the race for hydrogel-based cardiac regeneration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:414. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00414.

**5.** Nezamdoost-Sani N., Khaledabad M.A., Amiri S., Khaneghah A.M. Alginate and derivatives hydrogels in encapsulation of probiotic bacteria: an updated review. *Food Bioscience*. 2023;52:102433. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102433.

**6.** Strobel S.A., Knowles L., Nitin N., Scher H.B., Jeoh T. Comparative techno-economic process analysis of industrial-scale microencapsulation of bioactives in cross-linked alginate. *Journal of Food Engineering*. 2020;266:109695. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109695.

**7.** Bennacef C., Desobry-Banon S., Probst L., Desobry S. Optimization of core-shell capsules properties (Olive oil/alginate) obtained by dripping coextrusion process. *LWT*. 2022;167:113879. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113879.

**8.** Sharma A., Verma C., Singh P., Mukhopadhyay S., Gupta A., Gupta B. Alginate based biomaterials for hemostatic applications: innovations and developments. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;264:130771. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130771.

**9.** Solovieva E.V., Teterina A.Yu., Klein O.I., Komlev V.S., Alekseev A.A., Panteleyev A.A. Sodium alginate-based composites as a collagen substitute for skin bioengineering. *Biomedical Materials*. 2021;16:015002. DOI: 10.1088/1748-605X/abb524.

**10.** Vereshchagin A.L., Morozova E.A. Chemical and technological aspects of the production of heterogeneous alginate gels (review). *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2020;5:12–31. (In Russian). EDN: JSDDDDQ.

**11.** Bojorges H., López-Rubio A., Martínez-Abad A., Fabras M.J. Overview of alginate extraction processes: impact on alginate molecular structure and techno-functional properties. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;140:104142. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.104142.

**12.** Nath P.C., Sharma R., Debnath S., Sharma M., Inbaraj B.S., Dikkala P.K., et al. Recent trends in cellulose-based biodegradable polymers for smart food packaging industry. *International Journal of Biological*

*Macromolecules*. 2023;253:127524. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127524.

**13.** Saji S., Hebden A., Goswami P., Du C. A brief review on the development of alginate extraction process and its sustainability. *Sustainability*. 2022;14(9):5181. DOI: 10.3390/su14095181.

**14.** Silva M., Gomes F., Oliveira F., Morais S., Delerue-Matos C. Microwave-assisted alginate extraction from Portuguese *Saccorhiza polyschides* – influence of acid pretreatment. *International Journal of Chemical, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. 2015;9(1):30-33.

**15.** Chee S.-Y., Wong P.-K., Wong C.-L. Extraction and characterisation of alginate from brown seaweeds (*Fucales*, *Phaeophyceae*) collected from Port Dickson, Peninsular Malaysia. *Journal of Applied Phycology*. 2011;23:191-196. DOI: 10.1007/s10811-010-9533-7.

**16.** Fertah M., Belfkira A., Taourirte M., Brouillette F. Extraction and characterization of sodium alginate from Moroccan *Laminaria digitata* brown seaweed. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017;10:S3707-S3714. DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.05.003.

**17.** Mazumder A., Holdt S.L., De Francisci D., Alvarado-Morales M., Mishra H.N., Angelidaki I. Extraction of alginate from *Sargassum muticum*: process optimization and study of its functional activities. *Journal of Applied Phycology*. 2016;28:3625-3634. DOI: 10.1007/s10811-016-0872-x.

**18.** Hernandez-Carmona G., McHugh D.J., López-Gutiérrez F. Pilot plant scale extraction of alginates from *Macrocystis pyrifera*. 2. Studies on extraction conditions and methods of separating the alkaline-insoluble residue. *Journal of Applied Phycology*. 1999;11:493-502. DOI: 10.1023/A:1008114709681.

**19.** Truus K., Vaheer M., Taure I. Algal biomass from *Fucus vesiculosus* (*Phaeophyta*): investigation of the mineral

and alginate components. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Chemistry*. 2001;50(2):95-103. DOI: 10.3176/chem.2001.2.04.

**20.** Gomez C.G., Perez Lambrecht M.V., Lozano J.E., Rinaudo M., Villar M.A. Influence of the extraction-purification conditions on final properties of alginates obtained from brown algae (*Macrocystis pyrifera*). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2009;44(4):365-371. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2009.02.005.

**21.** Fourest E., Volesky B. Alginate properties and heavy metal biosorption by marine algae. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1997;67:215-226. DOI: 10.1007/BF02788799.

**22.** Akbar M., Yaqoob A., Ahmad A., Luque R. Sodium alginate: an overview. In: Ahmad A., Ahmad I., Kamal T., Asiri A.M., Tabassum S. (eds). *Sodium Alginate-Based Nanomaterials for Wastewater Treatment*. Elsevier; 2023, p. 1-17. DOI: 10.1016/B978-0-12-823551-5.00012-4.

**23.** Sartori C., Finch D.S., Ralph B., Gilding K. Determination of the cation content of alginate thin films by FTIR spectroscopy. *Polymer*. 1997;38(1):43-51. DOI: 10.1016/S0032-3861(96)00458-2.

**24.** Podkorytova A.V., Vafina L.Kh., Murav'eva E.A., Sharina Z.N. Sanitary and hygienic characteristics of brown algae of the White and Barents seas. *Rybprom: tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki vodnykh bioresursov*. 2009;4:33-39. (In Russian). EDN: KYGTPZ.

**25.** Ma J., Lin Y., Chen X., Zhao B., Zhang J. Flow behavior, thixotropy and dynamical viscoelasticity of sodium alginate aqueous solutions. *Food Hydrocolloids*. 2014;38:119-128. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.11.016.

**26.** Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Rheology: concepts, methods, and applications*. ChemTec Publishing; 2012, 473 p. DOI: 10.1016/C2011-0-04626-4.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Колотова Дарья Сергеевна,

к.х.н., ведущий научный сотрудник,  
Мурманский арктический университет,  
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13,  
Российская Федерация,  
✉ kolotovads@mauniver.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

### Боровинская Екатерина Валерьевна,

младший научный сотрудник,  
Мурманский арктический университет,  
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13,  
Российская Федерация,  
borovinskayaev2@mauniver.ru <https://orcid.org/0009-0005-3982-2372>

### Бордиян Влада Вадимовна,

младший научный сотрудник,  
Мурманский арктический университет,  
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13,  
Российская Федерация,  
bordiyanvv@mauniver.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-5680-8882>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Daria S. Kolotova,

Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher,  
Murmansk Arctic University,  
13, Sportivnaya St., Murmansk, 183010,  
Russian Federation,  
✉ kolotovads@mauniver.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

### Ekaterina V. Borovinskaya,

Junior Researcher,  
Murmansk Arctic University,  
13, Sportivnaya St., Murmansk, 183010,  
Russian Federation,  
borovinskayaev2@mauniver.ru <https://orcid.org/0009-0005-3982-2372>

### Vlada V. Bordiyan,

Junior Researcher,  
Murmansk Arctic University,  
13, Sportivnaya St., Murmansk, 183010,  
Russian Federation,  
bordiyanvv@mauniver.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-5680-8882>

**Деркач Светлана Ростиславовна,**  
д.х.н., профессор, главный научный сотрудник,  
Мурманский арктический университет,  
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13,  
Российская Федерация,  
derkachsr@mauniver.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5871-9320>

**Вклад авторов**

Д.С. Колотова – разработка концепции,  
получение финансирования, проведение  
исследования, административное руководство  
исследовательским проектом, визуализация,  
написание черновика рукописи,  
редактирование рукописи.  
Е.В. Боровинская – проведение исследования.  
В.В. Бордиян – проведение исследования.  
С.Р. Деркач – формальный анализ,  
научное руководство.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии  
конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили  
окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Поступила в редакцию 08.05.2024.  
Одобрена после рецензирования 21.08.2024.  
Принята к публикации 05.11.2025.

**Svetlana R. Derkach,**  
Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Chief Researcher,  
Murmansk Arctic University,  
13, Sportivnaya St., Murmansk, 183010,  
Russian Federation,  
derkachsr@mauniver.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5871-9320>

**Contribution of the authors**

Daria S. Kolotova – conceptualization,  
funding acquisition, investigation,  
project administration, visualization,  
writing – original draft, editing.  
Ekaterina V. Borovinskaya – investigation.  
Vlada V. Bordiyan – investigation.  
Svetlana R. Derkach – formal analysis,  
supervision.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interests  
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved  
by all the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 08.05.2024.  
Approved after reviewing 21.08.2024.  
Accepted for publication 05.11.2025.