

Разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески: влияние хитозана и пластификаторов на механические и барьерные свойства

Д. С. Колотова*, С. О. Воропаева, Л. А. Петрова

**Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;*

e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
04.06.2026;

принята
к публикации
25.06.2026

Ключевые слова:

биоразлагаемые
пищевые пленки,
пищевая упаковка,
переработка рыбных
отходов, коллаген,
хитозан,
полиэлектролитные
комплексы,
ИК-спектроскопия,
дифференциальная
сканирующая
калориметрия

Стремительный рост объемов синтетических полимерных отходов приводит к серьезным экологическим последствиям, по этой причине все большую значимость приобретает разработка экологичных альтернатив пищевой упаковке. Использование вторичных биоресурсов, в частности отходов переработки промысловых видов рыб, позволяет одновременно решить задачи утилизации побочных продуктов рыбоперерабатывающей промышленности и создания биоразлагаемых упаковочных материалов с регулируемыми свойствами. Цель исследования – разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции (ИХС), выделенной из отходов трески, а также изучение влияния хитозана (ХТЗ) и пластификаторов – глицерина (Г) и сорбитола (С) – на механические и барьерные свойства пленок. Выход ихтиосубстанции из кожи и чешуи атлантической трески составил 72 %. Методом ПААГ-электрофореза определены основные молекулярные фракции ихтиосубстанции: 200, 117, 100 и 89 кДа. Получена серия образцов биоразлагаемых пленок на основе ихтиосубстанции с добавлением хитозана и различных пластификаторов – глицерина и сорбитола. Комплексный анализ микроструктуры, физико-химических, механических, барьерных и термических свойств с использованием методов оптической микроскопии, ИК-спектроскопии, гравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, а также оценка способности к биоразложению в почве показали, что использование сорбитола в качестве пластификатора и увеличение содержания хитозана способствуют формированию более однородных, прочных и термически стойких пленок с пониженными показателями паропроницаемости и влагопоглощения. Оптимальный баланс механических и барьерных свойств наблюдается для образца состава 60 % ИХС + 37 % ХТЗ + 3 % С: прочность на разрыв – $12,1 \pm 1,1$ МПа, температура плавления – $130,4$ °С, паропроницаемость – 2819 ± 148 г/м²/сут, влагопоглощение – $49,0 \pm 6,3$ %/сут. Полученные результаты подтверждают перспективность использования коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески для создания экологичной пищевой упаковки, поддающейся биологическому разложению.

Для цитирования

Колотова Д. С. и др. Разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески: влияние хитозана и пластификаторов на механические и барьерные свойства. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 3. С. 317–334. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-317-334>.

Development of biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance derived from cod waste: The effect of chitosan and plasticizers on mechanical and barrier properties

Daria S. Kolotova*, Svetlana O. Voropaeva, Ludmila A. Petrova

*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;

e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Article info

Received
04.06.2026;

accepted
25.06.2026

Key words:

biodegradable
food films,
food packaging,
processing
of fish waste,
collage, chitosan,
polyelectrolyte
complexes,
IR spectroscopy,
differential scanning
calorimetry

Abstract

The rapid growth in the volume of synthetic polymer waste leads to serious environmental consequences, which is why the development of eco-friendly alternatives to food packaging is becoming increasingly important. The use of secondary bioresources, particularly processing waste from commercial fish species, allows simultaneously addressing the challenges of utilising by-products from the fish-processing industry and creating biodegradable packaging materials with tunable properties. The aim of this work is to develop biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance (ICS) extracted from cod waste, as well as to study the influence of chitosan (CS) and plasticisers, such as glycerol (G) and sorbitol (S), on the mechanical and barrier properties of the films. The yield of ichthyosubstance from the skin and scales of Atlantic cod was 72 %. Polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE) was used to determine the main molecular fractions of the ichthyosubstance, which were found to be 200, 117, 100 and 89 kDa. A series of biodegradable film samples was produced based on the obtained ichthyosubstance, with the addition of chitosan and various plasticisers (glycerol and sorbitol). Comprehensive characterisation of the microstructure, physicochemical, mechanical, barrier and thermal properties (via optical microscopy, IR spectroscopy, gravimetry and differential scanning calorimetry), together with an evaluation of soil biodegradability, demonstrated that incorporating sorbitol as a plasticiser and increasing the chitosan content leads to the formation of films exhibiting enhanced uniformity, durability and thermal stability, along with lower water vapour permeability and moisture absorption. An optimal balance of mechanical and barrier properties was observed for the sample with the following composition: 60 % ICS + 37 % CS + 3 % S. The sample exhibited the following properties: tensile strength – 12.1 ± 1.1 MPa; melting point – 130.4 °C; water vapour permeability – 2819 ± 148 g/m²/day; moisture absorption – 49.0 ± 6.3 %/day. The obtained results confirm the potential of using collagen-containing ichthyosubstance from cod waste for developing eco-friendly food packaging with controlled biodegradability.

For citation

Kolotova, D. S. et al. 2026. Development of biodegradable food films based on collagen-containing ichthyosubstance derived from cod waste: The effect of chitosan and plasticizers on mechanical and barrier properties. *Vestnik of MSTU*, 29(3), pp. 317–334. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-3-317-334>.

Введение

Производство и широкое применение синтетической пластиковой упаковки для хранения пищевой продукции, несмотря на ее низкую стоимость, высокую прочность и отличные барьерные характеристики, связаны со значительными экологическими рисками. На долю упаковки из пластика сегодня приходится около 40 % всех пластиковых отходов в мире (Kumar et al., 2025). При этом уровень переработки пластиковых отходов остается низким: по разным оценкам лишь 6–26 % пластиковых отходов перерабатываются для повторного использования, в то время как большая их часть накапливается на свалках или в естественной среде. При этом более 70 % этого объема приходится на одноразовый пластик, который в основном используется для упаковки пищи (Ncube et al., 2021). Наиболее серьезные опасения вызывает накопление значительных объемов неразлагаемых пластиковых отходов в окружающей среде, которые наносят непоправимый вред природе и животному миру (Robles-Vargas et al., 2025; Sheriff et al., 2025). Все это способствует стремительному развитию рынка биополимерных упаковочных материалов (Kumar et al., 2025).

Биоразлагаемые упаковочные материалы, получаемые из возобновляемых источников, могут стать перспективным решением проблемы загрязнения окружающей среды, благодаря чему они активно изучаются в течение последних десятилетий (He et al., 2025; Kumar et al., 2025). Биополимеры, такие как крахмал (Onyeaka et al., 2022), целлюлоза (Liu et al., 2023), животные и растительные белки (Zubair et al., 2020), а также полимолочная кислота (Rajendran et al., 2024), являются биоразлагаемыми, что делает их перспективными материалами для разработки безопасной альтернативы синтетическим полимерам. Многие из этих биополимеров получают из агропромышленных отходов, что повышает экологичность и экономическую целесообразность использования биоупаковки (Kumar et al., 2025). Эти биополимеры особенно востребованы в пищевой промышленности благодаря тому, что могут содержать биологически активные вещества, такие как натуральные противомикробные средства или антиоксиданты, которые помогают продлить срок хранения продуктов и предотвратить их порчу (Shaikh et al., 2021). Некоторые натуральные биополимеры обладают отличными пленкообразующими свойствами. Полисахариды, такие как целлюлоза, пектин, крахмал и альгинат натрия, обладают достаточными барьерными свойствами, а белки (например, казеин, желатин, проламины) способствуют повышению механической прочности, прозрачности и эластичности пленок (Kumar et al., 2025). Дополнительные добавки, такие как каррагинан, пуллулан, кефирин и хитозан, обладают функциональными преимуществами, в том числе антимикробной активностью и сниженной паропроницаемостью (Liyanaapathirana et al., 2023; Rostamabadi et al., 2024).

Пленки на основе желатина – продукта гидролиза коллагена, обладают высокой растяжимостью и высокой прозрачностью, но меньшей прочностью на разрыв и большей растворимостью в воде (Ramos et al., 2016). В сочетании с полисахаридами или биоактивными веществами, такими как хитозан, желатиновые покрытия эффективно подавляют развитие патогенных микроорганизмов, продлевая тем самым сроки хранения продукции, и демонстрируют увеличение барьерных свойств (Сергазиева и др., 2025; Li et al., 2025). В целом пленки на основе животных белков превосходят полисахаридные матрицы по механическим свойствам и паропроницаемости, но более чувствительны к влаге. Благодаря съедобности, прозрачности и совместимости с функциональными добавками они идеально подходят для нанесения покрытий и создания активной упаковки, представляя собой биоразлагаемую и безопасную альтернативу синтетическим полимерам.

В контексте поиска решений для повышения ресурсоэффективности важное значение приобретает разработка упаковочных материалов с применением биополимеров, полученных из биологических отходов. Особый интерес представляет рыбный желатин, выделяемый из рыбных отходов промысловых рыб (Еремеева и др., 2023). При разделке рыб образуется значительное количество побочных продуктов, в том числе кожа и чешуя, представляющих собой ценный источник желатина. При этом доля кожи и чешуи достигает 10 % от массы рыбы (Олдырев и др., 2023; Казакова и др., 2024). Кроме того, рыбный желатин более безопасен по сравнению с желатином из крупного рогатого скота, использование которого несет потенциальные риски возникновения аллергических реакций и передачи патогенов, вызывающих прионные заболевания, такие как губчатая энцефалопатия крупного рогатого скота (Gómez-Guillén et al., 2009).

Таким образом, внедрение технологии биоразлагаемых пищевых покрытий на основе желатина, выделенного из кожи и чешуи рыб, в сочетании с полисахаридами природного происхождения обеспечивает одновременное решение двух приоритетных задач: разработку экологически чистых защитных покрытий для применения в пищевой промышленности и рациональное использование продуктов переработки отходов рыбного производства в качестве основного сырья для данных покрытий. Комплексный подход способствует снижению антропогенной нагрузки и рациональному использованию биоресурсов.

Целью работы является разработка биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции, выделенной из отходов трески (кожи и чешуи), а также изучение влияния хитозана и пластификаторов (глицерина и сорбитола) на механические и барьерные свойства пленок.

Материалы и методы

В качестве сырья для получения коллагенсодержащей ихтиосубстанции использовали кожу и чешую трески атлантической. Свежее сырье промывали в проточной воде, замораживали и хранили в морозильной

камере при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Жидкую ихтиосубстанцию получали по методике, описанной в работе (Олдырев и др., 2023), с незначительными модификациями. Замороженное сырье измельчали в мясорубке, после чего смешивали измельченную кожу и чешую с 3%-м раствором уксусной кислоты в соотношении 1 : 1,15. pH полученной смеси составил 4,15. Проводили кислотный гидролиз в течение 40 мин при температуре $60,0 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и постоянном перемешивании со скоростью 400 об/мин. Нерастворившуюся часть отделяли путем фильтрации через капроновую ткань, после чего полученный фильтрат дважды центрифугировали со скоростью 5000 об/мин в течение 15 мин с использованием лабораторной центрифуги UC-1536E (ULAB, Китай). После получения жидкую ихтиосубстанцию направляли на анализ и использовали для приготовления пленок.

Содержание белка в жидкой ихтиосубстанции определяли спектрофотометрическим методом Варбурга – Кристиана (Layne, 1957), основанном на поглощении ультрафиолетового света белками при значениях длины волны 260 и 280 нм, с использованием ультрафиолетового спектрометра UNICO-2800 (UNICO, США) при толщине слоя 10 мм и температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание золы в ихтиосубстанции устанавливали путем сжигания образцов в муфельной печи при температуре $550 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание влаги определяли путем высушивания образцов пленок в сушильном шкафу при $105 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы.

Молекулярно-массовый состав ихтиосубстанции определяли методом вертикального электрофореза в полиакриламидном геле в присутствии додецилсульфата натрия (ПААГ-электрофорез) с использованием установки Mini-PROTEAN Tetra (BIO-RAD, США), оснащенной источником питания Эльф-8 (ООО "ДНК-Технология", Россия). Для разделения белков использовали градиентные полиакриламидные пластины и протеиновые гели TGX с концентрацией геля 8–16 % (BIO-RAD, США). Разделение белковых фракций проводили при силе тока 20 мА и напряжении 100 В. Для определения молекулярных масс белковых фракций использовали электрофоретический анализ подвижности стандартных маркеров (Servicebio Technology, Китай) – белков с известной молекулярной массой от 200 кДа до 10 кДа.

Готовили раствор хитозана из панциря креветки (Sigma, США) с концентрацией 4 мас.% в растворе уксусной кислоты с концентрацией 3 %. Степень деацетилирования хитозана составляет 76,2 %, среднемассовая молекулярная масса – 250 кДа (Derkach et al., 2025).

В качестве пластификаторов использовали глицерин дистиллированный пищевой ПК-94 (E422, Glycerine.ru LTD, Россия) с содержанием основного вещества не менее 99 % и сорбитол пищевой (E420, Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd., Китай) с содержанием основного вещества не менее 96 %.

Готовили смеси ихтиосубстанции, хитозана и пластификатора в соотношениях, указанных в табл. 1. После гомогенизации смесей проводили дегазацию под вакуумом при комнатной температуре в течение 30 мин для удаления растворенного воздуха. Готовые смеси массой $60,0 \pm 0,2\text{ г}$ заливали в силиконовые формы размером $13,5 \times 13,5\text{ см}$ и равномерно распределяли по дну формы. Силиконовые формы помещали в сушильный шкаф с принудительной конвекцией и высушивали при температуре $45 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 16 ч. После сушки готовые пленки аккуратно извлекали из форм и хранили в герметично закрывающихся zip-пакетах во избежание поглощения влаги и загрязнения пленок. В качестве образца сравнения использовали стандартную пищевую пленку из полиэтилена.

Таблица 1. Состав смесей, используемых для изготовления пленок

Table 1. Composition of mixtures used for film fabrication

Образец	Пластификатор	Содержание ихтиосубстанции, мас. %	Содержание 4%-го р-ра хитозана, мас. %	Содержание пластификатора, мас. %
1	Глицерин	70	26	4
2		60	37	3
3	Сорбитол	70	26	4
4		60	37	3

Изменение цвета пленок исследовали с использованием спектроцетопределятеля ColorReader CR9 (3nh, Китай). Полученные образцы анализировали с использованием модели CIE Lab. Общее цветовое отличие ΔE , выражающее отклонение воспроизводимого цвета от эталонного белого образца, определяли по формуле

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{0.5}, \quad (1)$$

где L – яркость (от 0 до 100, где 0 – черный, 100 – белый); a – параметр, выражающий изменение оттенка от зеленого до красного; b – параметр, выражающий изменение оттенка от синего до желтого.

Толщину готовых пленок измеряли в 10 различных точках при помощи цифрового микрометра REXBETI (Китай) с погрешностью измерений 0,001 мм.

Растворимость пленок в воде определяли гравиметрическим методом. Пленки предварительно высушивали в сушильном шкафу при 105 ± 2 °С, охлаждали до комнатной температуры, после чего добавляли 10 мл дистиллированной воды и выдерживали в закрытых емкостях в течение суток при комнатной температуре, осуществляя периодическое перемешивание. Нерастворившуюся часть пленки отделяли от растворителя декантацией, после чего пленки высушивали до постоянной массы при 105 °С. Растворимость пленок определяли по формуле

$$R = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100, \quad (2)$$

где m_0 – масса пленки до растворения, г; m_1 – масса пленки после выдерживания в воде и сушки, г.

Значение коэффициента пропускания пленок (T_{600}) определяли с использованием ультрафиолетового спектрометра UNICO-2800 (UNICO, США) при длине волны 600 нм относительно воздуха.

Исследование механических свойств пленок проводили с использованием разрывной машины ZP-500 (Китай), оснащенной динамометром с предельной нагрузкой 500 Н и электронным датчиком хода. Для испытаний вырезали образцы пленок размером 7×1 см. Исследование механических свойств пленок проводили в соответствии с ГОСТ Р 35226-2008¹.

Влагопоглощение пленок измеряли путем выдерживания высушенных образцов в эксикаторе с влажностью ≥ 98 % в течение 24 ч при температуре 25 ± 2 °С с последующим взвешиванием. Влагопоглощение (X , %) рассчитывали по формуле

$$X = \frac{m_w}{m_0} \times 100, \quad (3)$$

где m_w – масса влаги, поглощенной образцом через время t , г; m_0 – масса высушенной пленки, г.

Проницаемость пленок выявляли гравиметрическим методом, основанном на определении количества водяного пара, проходящего через материал, в соответствии с ГОСТ 21472-81² с модификациями. Для этого образцы пленок закрепляли на горлышках пробирок объемом 4 мл и диаметром 1,5 см, в которые предварительно помещали по 1 мл дистиллированной воды. Взвешивали пробирки с водой и пленками, после чего помещали в эксикатор и выдерживали при температуре 25 ± 2 °С в течение суток. Взвешивание пробирок проводили через 24 ч. Проницаемость пленок по отношению к водяному пару (WVP , г/м²) рассчитывали по формуле

$$WVP = \frac{10 \times \Delta m}{S}, \quad (4)$$

где Δm – изменение массы пробирки за время t , г; S – испытываемая площадь образца, м².

Поверхность пленок исследовали методом оптической микроскопии с использованием стереомикроскопа MC-1 var. 2C Digital (Микромед, Россия) при 4-кратном увеличении.

Инфракрасные спектры пропускания пленок регистрировали с использованием инфракрасного спектрометра с Фурье-преобразованием ФСМ 2202 (Инфраспек, Россия), оснащенном приставкой НПВО-Алмаз (Инфраспек, Россия) в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹ (количество сканирований – 50) с разрешением 4 см⁻¹. В качестве спектра сравнения использовали спектр чистой алмазной призмы. Проводили сравнение полученных спектров пленок со спектрами, полученными для образцов индивидуальных веществ, входящих в состав пленок.

Термические свойства пленок исследовали с использованием дифференциального сканирующего калориметра DZ-DSC300C (NanJing Testing Instruments, Китай). Регистрировали зависимость теплового потока (dQ/dT) от температуры. Перед измерениями прибор калибровали по стандартным материалам (In, Sn). Образцы пленок массой 10–12 мг вырезали по форме тигля, плотно укладывали в алюминиевый тигель с проколотой крышкой. В качестве образца сравнения использовали аналогичный пустой тигель с проколотой крышкой. Образцы исследовали в токе азота (скорость подачи – 25 мл/мин) в режиме нагрева со скоростью 10 °С/мин в диапазоне температур от 0 до 200 °С. Перед каждым измерением исследуемый образец выдерживали при температуре начала эксперимента (0 °С) в течение 5 мин.

Биоразлагаемость пленок исследовали путем экспозиции на поверхности и в толще увлажненного универсального питательного грунта. Биоразлагаемость пленок в почве определяли визуально, а также

¹ ГОСТ Р 35226-2008. Полотна нетканые. Методы определения прочности. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/48200/?ysclid=mqukh04jd9536318007>.

² ГОСТ 21472-81. Материалы листовые. Гравиметрический метод анализа. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13585/?ysclid=mqukh1mk8859998065>.

с использованием оптического микроскопа CX43 (Olympus, Япония). Эксперимент проводили в условиях естественного освещения в течение 20 суток при температуре 25 ± 2 °C и относительной влажности воздуха не более 65 %.

Статистическую обработку данных проводили в программной среде Microsoft Office с использованием *t*-критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P = 95$ %. Полученные значения выражали как среднее значение трех измерений со стандартным отклонением.

Результаты и обсуждение

Получена коллагенсодержащая ихтиосубстанция из отходов переработки атлантической трески – кожи и чешуи, выход жидкой ихтиосубстанции составил $72 \pm 1,0$ %. Ихтиосубстанция представляет собой полупрозрачную жидкость светло-желтого цвета с характерным слабым уксусным запахом. Содержание влаги в образце составляет $91,2 \pm 0,2$ %, белка – $7,0 \pm 1,0$ %, золы – $0,65 \pm 0,01$ %. Полученная коллагенсодержащая ихтиосубстанция характеризуется значением $pH = 3,98$ (табл. 2). Использование ихтиосубстанции в составе биоразлагаемых пленок способно оказывать ингибирующее действие на рост микроорганизмов за счет кислой среды, что потенциально повышает защитные свойства конечных материалов.

Таблица 2. Выход и характеристики ихтиосубстанции, выделенной из кожи и чешуи атлантической трески

Table 2. Yield and characteristics of ichthyosubstance extracted from the skin and scales of Atlantic cod

Выход, %	Содержание влаги, %	Содержание белка, %	Содержание золы, %	pH
$72,0 \pm 1,0$	$91,2 \pm 0,2$	$7,0 \pm 1,0$	$0,65 \pm 0,01$	$3,98 \pm 0,02$

Определены молекулярно-массовые характеристики ихтиосубстанции методом ПААГ-электрофореза (рис. 1).

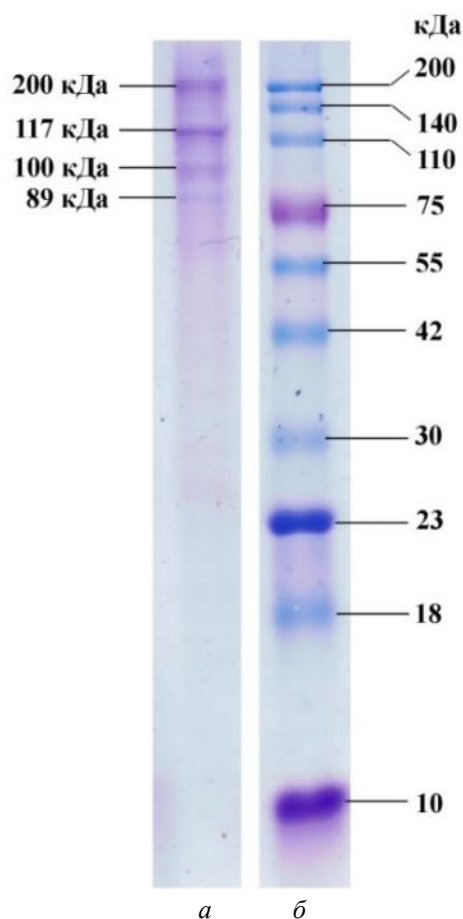


Рис. 1. Электрофореграммы ихтиосубстанции (а) и стандарта белков с молекулярными массами 10–200 кДа (б)

Fig. 1. Electropherograms of ichthyosubstance (a) and a protein standard with molecular weights of 10–200 kDa (b)

Анализ электрофореграмм демонстрирует наличие четырех основных белковых фракций в исследуемом образце. Наличие широких интенсивных полос, отвечающих фракциям с молекулярными массами 200 кДа и 117 кДа, указывает на высокое содержание частично гидролизованных β -цепей в ихтиосубстанции. Также на электрофореграмме присутствуют полосы белковых фракций с молекулярными массами порядка 100 кДа и 89 кДа, наличие которых свидетельствует о присутствии α -цепей и частично гидролизованных α -цепей соответственно. Низкая интенсивность полос на уровнях 100 и 89 кДа указывает на невысокое содержание данных компонентов в ихтиосубстанции. Наличие α - и β -фракций является характерным для желатина, выделенного из кожи трески (*Derkach et al.*, 2019). Таким образом, основным компонентом полученной ихтиосубстанции является желатин.

Коллагенсодержащая ихтиосубстанция была использована в качестве основы для получения биоразлагаемых пищевых пленок. В качестве структурообразователя использовали хитозан, в качестве пластификатора – глицерин и сорбитол. Различия в молекулярном строении и молекулярной массе глицерина и сорбитола определяют их различное действие на механические и барьерные свойства формируемых биополимерных пленок. Глицерин, представляющий собой трехатомный спирт с низкой молекулярной массой ($M = 92,09$ г/моль), легче проникает между полимерными цепями из-за малого размера, ослабляя межмолекулярные связи и повышая гибкость. Сорбитол, благодаря большему размеру молекулы ($M = 182,17$ г/моль) и сходству с глюкозными единицами, активнее взаимодействует с полимерными цепями, создавая прочные межмолекулярные связи и обеспечивая более высокую прочность материала (*Cao et al.*, 2018).

Внешний вид готовых пленок представлен на рис. 2. Пленки представляют собой однородные прозрачные глянцевые покрытия с желтоватым оттенком и характерным слабым укусным запахом.

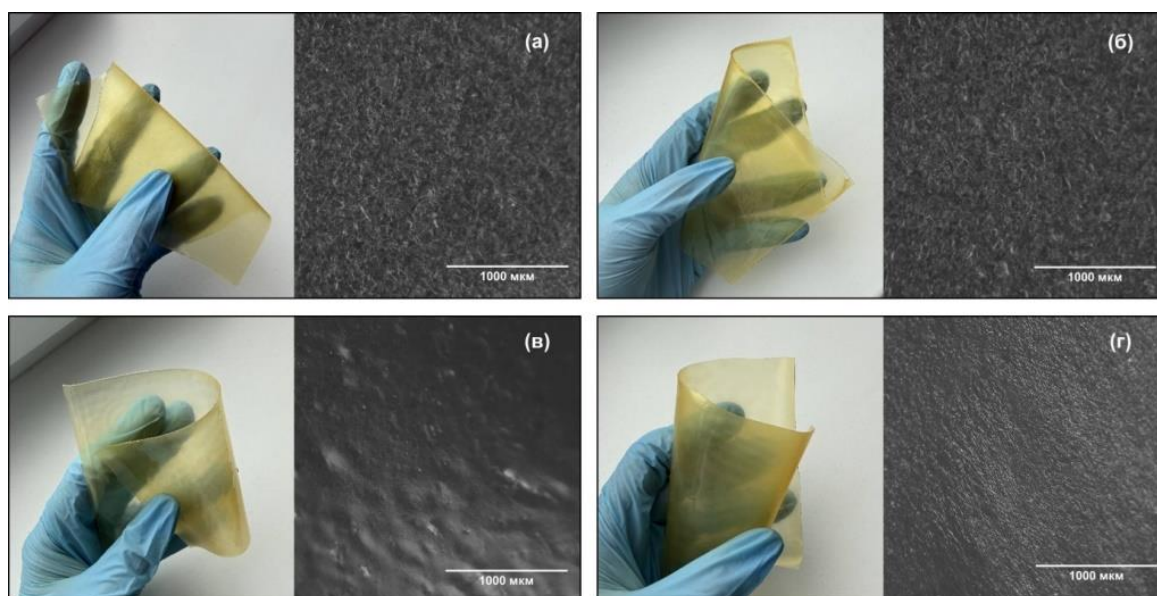


Рис. 2. Внешний вид и микрофотографии полученных пленок, где *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3; *г* – образец 4. Увеличение – 4X

Fig. 2. Appearance and microphotographs of the obtained films where *a* – sample 1; *б* – sample 2; *в* – sample 3; *г* – sample 4. Magnification – 4X

Цветовые характеристики пленок приведены в табл. 3. При увеличении содержания хитозана в системе смещение оттенка образцов в желтую область увеличивается, о чем свидетельствует рост значений b^* , при этом тип пластификатора на желтизну образцов практически не влияет. Значения параметра a^* для всех образцов имеет отрицательное значение, что свидетельствует о смещении оттенка в зеленую область. Значения параметра L^* , отражающего изменение яркости цвета, лежат в диапазоне от 86 до 87 и близки к 100. Наибольшими значениями общего цветового отличия от эталона ΔE^* характеризуются образцы 2 и 4.

Таблица 3. Цветовые характеристики пленок
Table 3. Color characteristics of films

Образец	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
1	87,28	–2,42	25,86	27,48
2	87,05	–2,33	31,97	33,18
3	87,42	–1,28	24,47	26,09
4	85,99	–1,20	30,11	31,81

Анализ микроструктуры пленок демонстрирует значительные отличия при использовании различных пластификаторов. Поверхность образцов 1 и 2, пластифицированных глицерином (рис. 2, а, б), характеризуется аморфно-волокнистой структурой, также на поверхности визуализируются хаотично расположенные микропоры и углубления, что может приводить к более высокой проницаемости для газов и влаги. Поверхность пленок, пластифицированных сорбитолом, имеет более однородную структуру, представленную волокнами и фибриллами (рис. 2, в, г). На поверхности образца 3 (рис. 2, в) наблюдаются локальные уплотнения и/или скопления частиц (более светлые области), что может свидетельствовать о неравномерном распределении компонентов или кристаллизации сорбитола при сушке. Подобная морфология типична для белковых композитов, в которых макромолекулы коллагена и хитозана склонны к самосборке в надмолекулярные структуры (*Jridi et al., 2014*). Поверхность образца 4 имеет умеренную шероховатость с выраженной фибриллярной морфологией: прослеживается сеть переплетающихся тонких волокон (рис. 2, г). Это свидетельствует о формировании надмолекулярной структуры, характерной для белковых и полисахаридных компонентов. Между волокнами визуализируются равномерно распределенные мелкие углубления и поры. Также на поверхности образца 4 отсутствуют выраженные кристаллические включения, что может свидетельствовать о равномерном распределении компонентов в матрице и отсутствии локальной кристаллизации сорбитола на поверхности. В отличие от идеально гладких синтетических пленок, на поверхности пленки наблюдается развитый микрорельеф, но при этом структура является более упорядоченной и однородной по сравнению с образцами 1–3.

Исследованы физико-химические свойства пленок, результаты приведены в табл. 4. Установлено, что полученные пленки характеризуются толщиной порядка 0,3 мм, что в 10 раз превышает толщину пищевой пленки из полиэтилена. Содержание влаги в пленках, пластифицированных глицерином, варьируется от 32 до 35 %, в то время как содержание влаги в пленках, пластифицированных сорбитолом, значительно ниже и составляет порядка 10 %. Глицерин обладает более высокой гидрофильностью по сравнению с сорбитолом, вследствие чего сильнее удерживает влагу в полимерной матрице пленки (*Al-Hassan et al., 2012*).

Таблица 4. Физико-химические свойства пленок
Table 4. Physicochemical properties of films

Образец	Состав образца	Содержание влаги, %	Толщина пленки, мм	Растворимость, %	Пропускание T_{600} , %
1	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % Г ^в	35,6 ± 2,3	0,30 ± 0,10	30,7 ± 6,1	48,5 ± 4,5
2	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % Г ^в	32,0 ± 4,4	0,32 ± 0,13	29,2 ± 5,2	63,2 ± 4,2
3	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % С ^г	10,2 ± 0,5	0,27 ± 0,13	23,5 ± 5,4	49,0 ± 4,8
4	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % С ^г	10,7 ± 3,3	0,28 ± 0,12	24,6 ± 5,5	64,5 ± 4,0
5	Полиэтилен	–	0,03 ± 0,01	–	90,6 ± 0,2

Примечание. а – ихтиосустанция, б – хитозан, в – глицерин, г – сорбитол.

Установлено, что введение сорбитола в качестве пластификатора приводит к незначительному уменьшению растворимости пленок на 5–7 % по сравнению с аналогичными образцами, пластифицированными глицерином (табл. 4). Такое поведение может быть обусловлено различиями во взаимодействии пластификаторов с полимерной матрицей, а также гидрофильной природой глицерина, которая увеличивает сродство пленок к воде и ухудшает их гигроскопические характеристики (*Al-Hassan et al., 2012; Cao et al., 2018*).

Коэффициент пропускания пленок варьируется в диапазоне от 48 до 64 % (табл. 4), т. е. материалы являются полупрозрачными, что может свидетельствовать о высоком поглощении пленками проходящего света либо его частичном отражении от поверхности пленок. Материалы со средними значениями коэффициента светопропускания, т. е. частично блокирующие ультрафиолетовое излучение, способны обеспечить достаточную защиту продукта от фотохимического разрушения в процессе хранения, при этом уровень пропускания видимого света остается достаточным для визуального контроля содержимого без вскрытия упаковки (*Cao et al., 2018*).

Получены ИК-спектры образцов пленок, а также индивидуальных веществ, входящих в их состав (рис. 3). Спектр коллагенсодержащей ихтиосустанции содержит характерные для желатина полосы поглощения: 3338 (Амид А, растяжение связи N–H), 1638 (Амид I, растяжение связи C=O), 1591–1460 (Амид II, деформационные колебания NH-групп и колебания растяжения CN-групп), 1266 (Амид III, растяжение связей C–N и N–H) (*Pranoto et al., 2007; Staroszczyk et al., 2012*). На спектре хитозана наблюдается широкая полоса поглощения в области 3418, соответствующая валентными колебаниями O–H и N–H связей, а также полосы 1648, 1560 и 1407 см⁻¹, соответствующие связям Амид I, Амид II и деформационным

колебаниям О–Н групп. Наличие перечисленных полос поглощения согласуется с данными, приведенными для хитозана (Abugoch *et al.*, 2011).

При введении хитозана в состав пленок (образцы 1–4, рис. 3) на основе коллагенсодержащей ихтиосустанции наблюдается сдвиг полосы поглощения Амид А в сторону более низких волновых чисел: с 3338 до 3284–3281 см^{-1} , что указывает на образование межмолекулярных водородных связей между желатином и хитозаном (Staroszczyk *et al.*, 2014; Voron'ko *et al.*, 2016). Сдвиг полосы Амид II хитозана с 1560 до 1533–1541 см^{-1} подтверждает наличие электростатических взаимодействий между карбоксильными группами белка и аминогруппами хитозана и образование полиэлектролитных комплексов (Staroszczyk *et al.*, 2014). Формирование полиэлектролитных комплексов на основе желатина и хитозана ранее подтверждалось в работах (Pereda *et al.*, 2011; Rivero *et al.*, 2009; Sionkowska *et al.*, 2004). Кроме того, на спектрах наблюдается смещение полосы Амид II ихтиосустанции с 1591 в область 1533–1541 см^{-1} , что может также указывать на образование водородных связей, в которых участвуют группы –NH ихтиосустанции (Staroszczyk *et al.*, 2014). Изменения интенсивности полосы Амид III и сдвиг с 1266 см^{-1} в область 1242–1246 см^{-1} при различных соотношениях ихтиосустанции и хитозана указывают на то, что аминогруппы хитозана взаимодействуют преимущественно с карбоксильными группами желатина посредством электростатических взаимодействий (Jridi *et al.*, 2014; Pereda *et al.*, 2011; Rivero *et al.*, 2009).

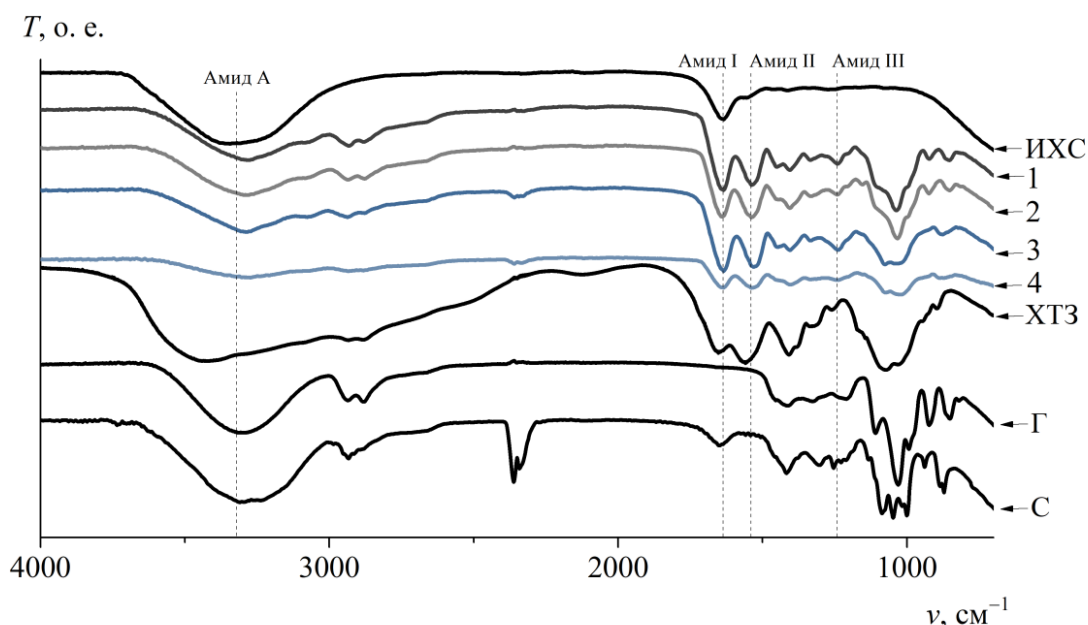


Рис. 3. Инфракрасные спектры образцов пленок (1–4), ихтиосустанции (ИХС), хитозана (ХТЗ), глицерина (Г) и сорбитола (С)

Fig. 3. Infrared spectra of film samples (1–4), ichthyosubstance (ИХС), chitosan (ХТЗ), glycerol (Г) and sorbitol (С)

Необходимо отметить, что спектральные изменения в области валентных колебаний О–Н и N–H групп (3500–3000 см^{-1}) биополимеров могут быть также связаны с различным пластифицирующим действием сорбитола и глицерина, содержащих гидроксильные группы, которые способны образовывать водородные связи с гидроксильными и аминогруппами хитозана и желатина. На спектрах наблюдается сдвиг полос, отвечающих деформационным колебаниям гидроксильных групп глицерина и сорбитола, из области 1416–1417 см^{-1} в область 1404–1406 см^{-1} для пленок, что может указывать на образование дополнительных водородных связей между гидроксильными группами пластификаторов и функциональными группами хитозана и желатина. Кроме того, полоса Амид А на спектрах пленок 3–4, пластифицированных сорбитолом, оказывается более узкой по сравнению со спектрами пленок, пластифицированных глицерином (образцы 1–2). Сорбитол имеет склонность к формированию кристаллических областей при высыхании пленки, эти области создают локальные жесткие участки, где водородные связи упорядочены. Это приводит к меньшей пластификации пленок и повышению жесткости материала (Ma *et al.*, 2018). Глицерин образует множественные водородные связи с ОН– и NH–группами биополимеров. Это нарушает упорядоченность водородных связей внутри матрицы, заставляя молекулы колебаться в более широком диапазоне частот

(Rosmawati et al., 2025; Al-Hassan et al., 2012). Таким образом, глицерин увеличивает подвижность молекул, что приводит к повышению эластичности пленок.

Для оценки влияния структурных изменений пленок, происходящих при варьировании типа пластификатора и содержания хитозана, на механические свойства пленок определены показатели прочности на разрыв и относительного удлинения при разрыве, являющиеся фундаментальными характеристиками упаковочных материалов пищевого назначения. Данные показатели оказывают влияние на способность материалов сопротивляться внешнему воздействию и сохранять их целостность (Jridi et al., 2014).

С использованием разрывной машины исследованы механические свойства пленок. Полученные результаты для разработанных пленок (образцы 1–4) сравнивали с результатами механических испытаний пищевой пленки из полиэтилена (образец 5). Установлено, что полученные образцы характеризуются более высокой прочностью на разрыв по сравнению с полиэтиленовой пленкой, для которой $\sigma = 3,3$ МПа (рис. 4, а). При этом наиболее высокие показатели прочности на разрыв продемонстрировали образцы 3 и 4, пластифицированные сорбитолом: 6,5 и 12,1 МПа соответственно.

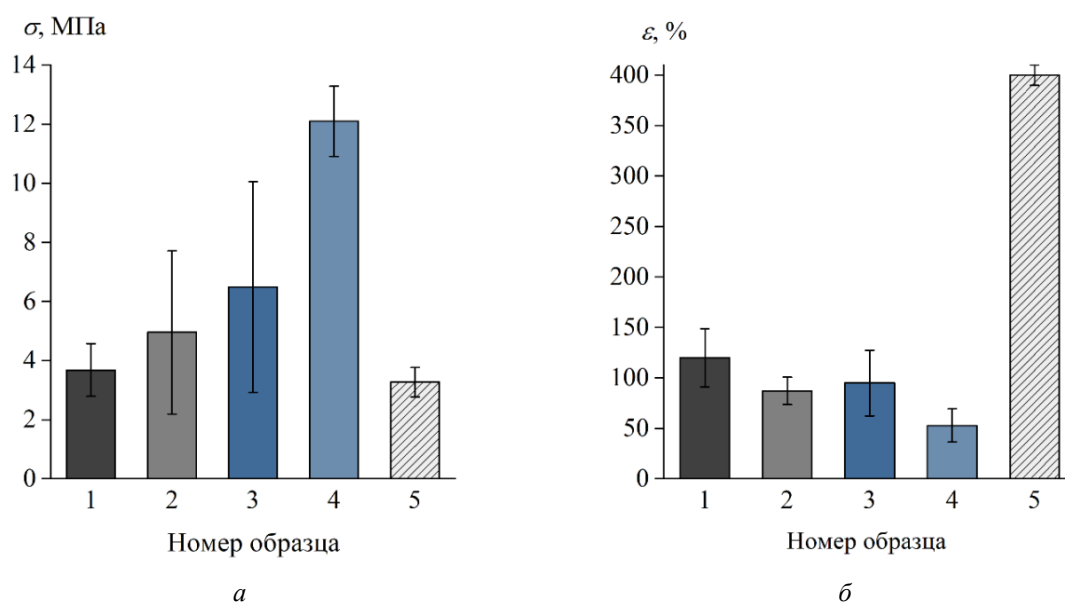


Рис. 4. Прочность на разрыв (а) и относительное удлинение при разрыве (б) образцов пленок (1–4) и пленки из полиэтилена (5)

Fig. 4. Tensile strength (a) and elongation at break (b) of film samples (1–4) and a polyethylene film (5)

Для всех образцов наблюдается увеличение прочности на разрыв при повышении доли хитозана в полимерной матрице (рис. 4, а): с 3,7 до 4,9 МПа для пленок, пластифицированных глицерином, и с 6,5 до 12,1 МПа для пленок с сорбитолом. Эти изменения связаны с особенностями взаимодействия компонентов и их влиянием на механические свойства материала. Полимерная цепь хитозана обладает более высокой жесткостью по сравнению с желатином, составляющим основу ихтиосубстанции (Hosseini et al., 2013). При увеличении его доли в составе пленки общая жесткость материала возрастает, что способствует повышению прочности. Это связано с тем, что макромолекулы хитозана содержат большое количество аминогрупп, которые могут участвовать в образовании водородных связей и электростатических взаимодействий с другими компонентами матрицы. Это приводит к образованию более плотной пространственной структуры, которая усиливает механические свойства пленки. Аналогичные результаты были получены в работах (Jridi et al., 2014; Hosseini et al., 2013; Xu, 2025).

При анализе пластических свойств выявлено обратное соотношение между прочностью и удлинением при разрыве: с ростом содержания хитозана и увеличением прочности пленок наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве (рис. 4, б). Наибольшее снижение пластичности отмечено для образцов 3 и 4, пластифицированных сорбитолом (94 и 52 % соответственно), что коррелирует с их максимальной прочностью. Более жесткая структура, формируемая сорбитолом и хитозаном, ограничивает способность материала к деформации. Образцы 1 и 2, пластифицированные глицерином, демонстрируют более высокие значения удлинения при разрыве при сопоставимом содержании хитозана: 120 и 87 % соответственно. Пластифицирующие свойства глицерина частично компенсируют жесткость хитозановой матрицы, сохраняя эластичность пленки.

Количественный анализ механических свойств биополимерных пленок позволяет установить корреляцию с данными ИК-спектроскопии, отражающими структурные изменения на молекулярном уровне. Сдвиги характеристических частот и изменения относительной интенсивности полос Амид А и Амид I-III (рис. 3) свидетельствуют о реорганизации сети водородных связей и перераспределении межмолекулярных взаимодействий. Эти процессы непосредственно определяют изменения механических параметров пленок (прочности и относительного удлинения).

Ключевую роль в обеспечении сохранности пищевой продукции играют также барьерные свойства упаковочных материалов, которые количественно оцениваются по показателям паропроницаемости и влагопоглощения, поскольку они лимитируют массоперенос влаги и кислорода, тем самым ингибируя окислительные реакции, потерю влаги и микробную контаминацию, что позволяет продлить сроки хранения и сохранить свойства продукта (*Reji et al.*, 2025).

Паропроницаемость пленок исследовали гравиметрическим методом, основанном на определении количества водяного пара, проходящего через материал (рис. 5, а). Установлено, что значения паропроницаемости пленок, пластифицированных сорбитолом, превосходят значения для пленок с глицерином в 1,5 раза. Полученные данные коррелируют с результатами морфологического и структурного анализа: пленки с сорбитолом характеризуются более упорядоченной и однородной микроструктурой, что обуславливает меньшую степень аэрации материала. При этом варьирование содержания хитозана в составе пленок не оказывает статистически значимого влияния на величину паропроницаемости. Необходимо отметить, что для материалов, применяемых для производства упаковочных материалов, наиболее предпочтительны низкие показатели пропускаемости водяного пара, необходимые для обеспечения безопасного и длительного хранения пищевых продуктов (*Reji et al.*, 2025). Значения паропроницаемости полученных образцов существенно превосходят аналогичный показатель для пленки из полиэтилена, что является характерной особенностью биополимерных пленок (*Hosseini et al.*, 2013).

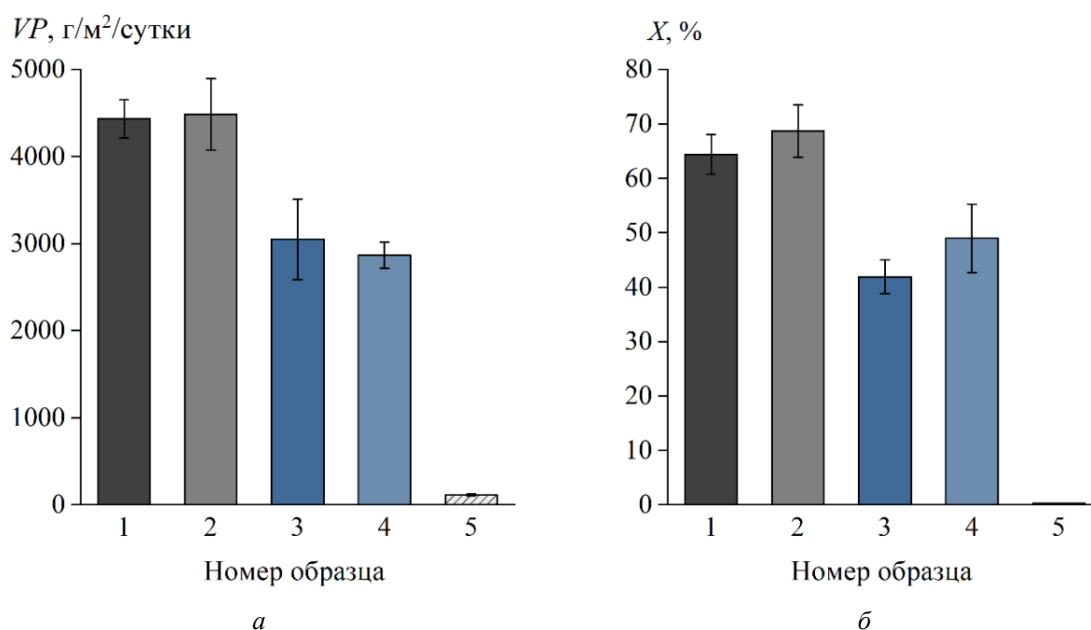


Рис. 5. Паропроницаемость (а) и влагопоглощение (б) образцов пленок (1–4) и пленки из полиэтилена (5)
Fig. 5. Water vapor permeability (a) and water absorption (б) of film samples (1–4) and a polyethylene film (5)

Также исследовано влагопоглощение пленок (рис. 5, б). Пленки, пластифицированные сорбитолом, демонстрируют более низкие показатели влагопоглощения по сравнению с образцами, пластифицированными глицерином. Наблюдаемые различия могут быть связаны с более высокой гидрофильностью глицерина: он легче взаимодействует с водой посредством водородных связей. Кроме того, глицерин из-за меньшего размера частиц обладает значительной способностью взаимодействовать с цепочками желатина, тем самым повышая молекулярную подвижность и увеличивая свободный объем внутри пленок. Таким образом, более гидрофильная природа глицерина и малый молекулярный вес усиливают сродство материалов, пластифицированных им, к воде (*Al-Hassan et al.*, 2012; *Cao et al.*, 2018). Существенного влияния на показатель влагопоглощения содержание хитозана в пленках не оказывает.

При оценке упаковочных материалов существенное значение имеет также температура плавления: она определяет технологические параметры производства (температурные режимы экструзии, термоформования и пр.), эксплуатационную стабильность упаковки при воздействии повышенных температур, а также безопасность при контакте с пищевыми продуктами в условиях термической обработки, транспортировки

и хранения (Shah et al., 2024). На рис. 6 приведены зависимости теплового потока от температуры в режиме динамического нагрева со скоростью 10 °С/мин.

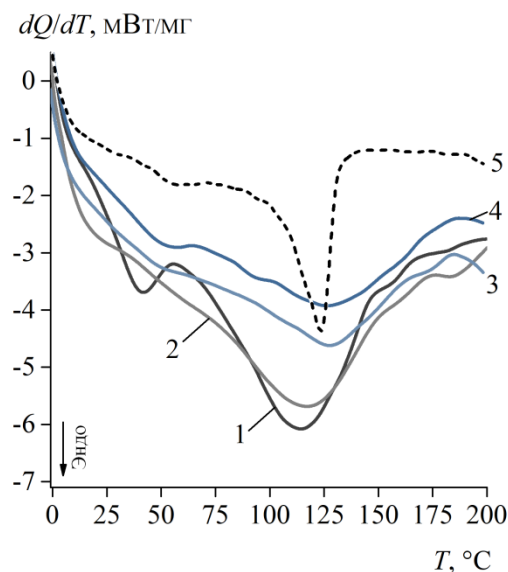


Рис. 6. Термограммы биополимерных пленок (1–4) и пленки из полиэтилена (5)
Fig. 6. Thermograms of biopolymer films (1–4) and a polyethylene film (5)

Анализ полученных термограмм демонстрирует сложное поведение биополимерных пленок в процессе нагрева. Для образцов 1–4 на полученных зависимостях наблюдаются переходы стеклования в области 50–95 °С, указывающие на аморфную структуру материала, за которыми следуют широкие пики плавления. При этом переходы стеклования для образцов 3–4, пластифицированных сорбитолом, смещаются в область более высоких температур. Эндотермические пики, наблюдаемые на кривых нагрева, связаны с плавлением областей биополимеров испарением воды, удерживаемой в матрице пленок.

Установлено, что образцы пленок 1 и 2, пластифицированные глицерином, характеризуются низкими значениями температуры плавления, которые составляют 114 и 117 °С соответственно (табл. 5). Для образцов 3 и 4, модифицированных сорбитолом, характерны более высокие температуры плавления – 128 и 130 °С, что превышает соответствующие показатели для пленок, содержащих глицерин, примерно на 10 °С. Вероятно, наблюдаемые различия могут быть связаны с различным содержанием влаги в пленках (35,6–32,0 % для пленок, пластифицированных глицерином, и 10,2–10,7 % для пленок, пластифицированных сорбитолом). Сорбитол менее гигроскопичен, чем глицерин, поэтому в пленках присутствует меньше свободной влаги, и процесс испарения протекает плавно, а пик плавления менее выражен. Благодаря этому сорбитол обеспечивает большую жесткость и термическую стабильность материала по сравнению с глицерином. Увеличение массовой доли хитозана в составе пленок во всех исследованных образцах приводит к незначительному росту температуры плавления (2–3 °С). Для сравнительной оценки полученных результатов определена температура плавления эталонного образца – пленки из полиэтилена, которая составила 123,7 °С. Таким образом, образцы пленок 3 и 4, пластифицированные сорбитолом, превосходят традиционную упаковочную пленку на основе полиэтилена по термической стойкости.

Таблица 5. Термические свойства пленок
Table 5. Thermal properties of films

Образец	Состав образца	$T_{нач}, ^\circ\text{C}$	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_{кон}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{пл}, \text{Дж/г}$
1	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % Г ^в	82,1	114,4	143,4	81,8
2	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % Г ^в	84,2	117,1	151,0	137,4
3	70 % ИХС ^а + 26 % ХТЗ ^б + 4 % С ^г	70,7	128,3	172,7	47,5
4	60 % ИХС ^а + 37 % ХТЗ ^б + 3 % С ^г	99,2	130,4	158,4	44,1
5	Полиэтилен	114,0	123,7	129,9	77,6

Примечание. а – иктиосубстанция, б – хитозан, в – глицерин, г – сорбитол.

Необходимо отметить, что полиэтилен плавится в более узком температурном диапазоне – от 114,0 до 129,9 °С, в то время как диапазоны плавления биополимерных пленок, пластифицированных сорбитолом и глицерином, существенно шире и лежат в области 82–117 и 71–130 °С соответственно (табл. 5).

Кристаллические области полиэтилена достаточно однородны, при нагреве происходит постепенное разрушение кристаллитов, но общая структура материала резко изменяется только в момент плавления. Кроме того, полиэтилен является монокомпонентной системой, в которой отсутствуют водородные связи, и тепловые эффекты преимущественно связаны с фазовым переходом "твердое тело – жидкость" (*Serra et al., 2000*). Образцы биоразлагаемых пленок, напротив, представляют собой сложную многокомпонентную систему, при нагревании которой фазовый переход происходит в более широком температурном интервале. Биополимеры (желатин, хитозан) более чувствительны к температуре, чем полиэтилен. При нагреве они могут подвергаться денатурации и разрушению структуры. При этом желатин и хитозан образуют полиэлектролитные комплексы, что также усложняет термическое поведение системы (*Jridi et al., 2014*).

Исследована биоразлагаемость полученных биополимерных пленок в почве. При изучении разложения пленок на поверхности почвы уже на 5 сутки наблюдалось изменение цвета и помутнение пленок (рис. 7). Кроме того, пленки уменьшились в размере и истончились. На 20 сутки наблюдения на поверхности пленок было отмечено разрастание мицелия (рис. 8). В толще грунта на 20 сутки фрагменты пленок не визуализировались. Таким образом, можно сделать вывод о том, что пленки являются биоразлагаемыми, поскольку наблюдаются визуальные признаки биодеструкции под действием микробиоты почвы, снижение физических свойств и наличие протекания микробиологических процессов (разрастание мицелия на поверхности пленок).



Рис. 7. Внешний вид пленок на 5 сутки хранения на поверхности грунта
Fig. 7. Film appearance after 5 days stored on soil surface

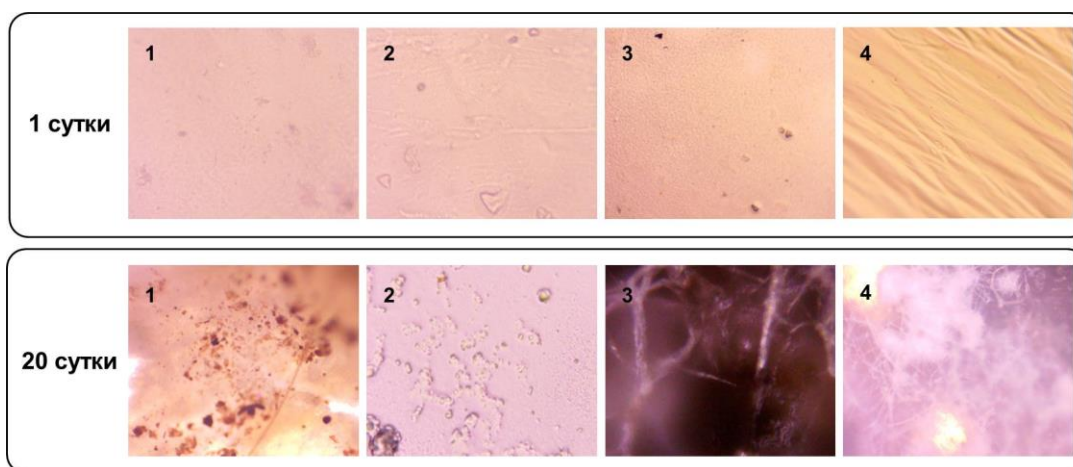


Рис. 8. Микрофотографии пленок (образцы 1–4) до и на 20 сутки хранения на поверхности грунта.
Увеличение – 40X
Fig. 8. Microphotographs of films (samples 1–4) before and after 20 days stored on soil surface.
Magnification – 40X

Заключение

В работе получена коллагенсодержащая ихтиосубстанция из отходов переработки атлантической трески – кожи и чешуи, выход ихтиосубстанции составил 72 %. Методом ПААГ-электрофореза установлено содержание основных молекулярных фракций в ихтиосубстанции: 200, 117, 100 и 89 кДа. Разработана серия образцов биоразлагаемых пищевых пленок на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески с добавлением хитозана и различных пластификаторов (глицерина и сорбитола). Проведен комплексный анализ микроструктуры, физико-химических, механических, барьерных и термических свойств полученных материалов, а также оценена их способность к разложению в почве. Установлено, что использование сорбитола в качестве пластификатора способствует формированию более однородных, прочных и термически стойких пленок, а также обеспечивает более низкие показатели паропроницаемости и влагопоглощения. Аналогичные закономерности наблюдаются и при увеличении содержания хитозана в исследуемых системах.

Таким образом, варьирование типа пластификатора и концентрации хитозана позволяет целенаправленно регулировать барьерные и механические свойства биополимерных пленок.

Разработанные биоразлагаемые пленки обладают рядом улучшенных свойств по сравнению с традиционными синтетическими аналогами: повышенной прочностью, регулируемой эластичностью, удовлетворительными барьерными характеристиками и способностью к биоразложению. Оптимальные показатели достигнуты для образца 4 (состав: 60 % ИХС + 37 % ХТЗ + 3 % С), который сочетает высокую прочность $12,1 \pm 1,1$ МПа и термостойкость ($T_{пл} = 130,4$ °С), а также лучшие барьерные свойства среди исследованных образцов биополимерных пленок: паропроницаемость – $2\,819 \pm 148$ г/м²/сут и влагопоглощение $49,0 \pm 6,3$ %/сут, что связано с формированием наиболее упорядоченной и равномерной микроструктуры.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования коллагенсодержащей ихтиосубстанции из отходов трески в качестве основы для экологичной пищевой упаковки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию композиции биополимерных пленок для снижения влагопоглощения и повышения барьерных свойств, а также на масштабирование технологии производства с учетом экономической эффективности и устойчивого использования рыбных отходов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FENR-2024-0001 (рег. № 1023041300048-6-2.9.1) "Комплексная безотходная переработка биоресурсов арктического региона, развитие биотехнологий в Арктике, обеспечение продовольственной безопасности и повышение качества жизни (продолжение)". Авторы выражают благодарность Нижник Варваре Алексеевне (МБОУ ЗАТО г. Североморск "Лицей № 1") за помощь в проведении экспериментальной части работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Еремеева С. В., Сергазиева О. Д., Сопрунова О. Б., Жукова О. И. [и др.]. Влияние биоразлагаемой ихтиожелатиновой пленки на качество мясных полуфабрикатов при хранении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11, № 3. С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.14529/food230308>. EDN: YUIPIF.
- Казакова В. С., Землякова Е. С. Исследования по комплексной переработке коллагенсодержащего рыбного сырья // Известия КГТУ. 2024. № 72. С. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-72-81-91>.
- Олдырев Д. В., Сергазиева О. Д., Ярцева Н. В., Бахарева А. А. Получение коллагенсодержащей ихтиосубстанции из вторичных рыбных ресурсов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 3. С. 182–198. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.451>. EDN: KRZPYR.
- Сергазиева О. Д., Еремеева С. В., Олдырев Д. В. Обоснование увеличения срока годности продуктов, хранящихся в пищевой пленке на основе коллагенсодержащей ихтиосубстанции // Хранение и переработка сельхозсырья. 2025. Т. 33, № 2. С. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.651>. EDN: XEUJZG.
- Abugoch L. E., Tapia C., Villamán M. C., Yazdani-Pedram M. [et al.]. Characterization of quinoa protein-chitosan blend edible films // Food Hydrocolloids. 2011. Vol. 25, Iss. 5. P. 879–886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.008>.
- Al-Hassan A. A., Norziah M. H. Starch-gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers // Food Hydrocolloids. 2012. Vol. 26, Iss. 1. P. 108–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>.
- Cao L., Liu W., Wang L. Developing a green and edible film from Cassia gum: The effects of glycerol and sorbitol // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 175. P. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.064>.
- Derkach S. R., Kuchina Y. A., Baryshnikov A. V., Kolotova D. S. [et al.]. Tailoring cod gelatin structure and physical properties with acid and alkaline extraction // Polymers. 2019. Vol. 11, Iss. 10. Article number: 1724. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101724>.
- Derkach S., Voron'ko N., Bordiyan V., Dyakina T. [et al.]. Influence of chitosan on fish gelatin hydrogel: Rheological properties and microstructure // Polysaccharides. 2025. Vol. 6, Iss. 4. Article number: 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6040110>.
- Gómez-Guillén M. C., Pérez-Mateos M., Gómez-Estaca J., López-Caballero E. [et al.]. Fish gelatin: A renewable material for developing active biodegradable films // Trends in Food Science & Technology. 2009. Vol. 20, Iss. 1. P. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.10.002>.
- He B., Gao Y., Lou W., Wang J. [et al.]. Biodegradable food packaging films: Material source, mechanical and water vapor barrier properties, and improvement strategies – A comprehensive review // Food Research International. 2025. Vol. 211. Article number: 116431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116431>.

- Hosseini S. F., Rezaei M., Zandi M., Ghavi F. F. Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films // *Food Chemistry*. 2013. Vol. 136, Iss. 3–4. P. 1490–1495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.081>.
- Jridi M., Hajji S., Ben Ayed H., Lassoued I. [et al.]. Physical, structural, antioxidant and antimicrobial properties of gelatin-chitosan composite edible films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2014. Vol. 67. P. 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.03.054>.
- Kumar A., Kumar A., Wei S., Chopra S. [et al.]. Biodegradable and smart packaging films for food quality and safety: A review // *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, Iss. 2. Article number: 101491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101491>.
- Layne E. Spectrophotometric and turbidimetric methods for measuring proteins // *Methods in Enzymology*. Academic Press, 1957. Vol. 3. P. 447–454. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(57\)03413-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(57)03413-8).
- Li C., Yang Y., Zhang R., Wang J. [et al.]. Chitosan-gelatin composite hydrogel antibacterial film for food packaging // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 285. Article number: 138330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138330>.
- Liu X., Qin Z., Ma Y., Liu H. [et al.]. Cellulose-based films for food packaging applications: Review of preparation, properties, and prospects // *Journal of Renewable Materials*. 2023. Vol. 11, Iss. 8. P. 3203–3225. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.027613>.
- Liyanapathirana A., Dassanayake R. S., Gamage A., Karri R. R. [et al.]. Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables // *Coatings*. 2023. Vol. 13, Iss. 7. Article number: 1177. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13071177>.
- Ma X., Qiao C., Zhang J., Xu J. Effect of sorbitol content on microstructure and thermal properties of chitosan films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. Vol. 119. P. 1294–1297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.060>.
- Ncube L. K., Ude A. U., Ogunmuyiwa E. N., Zulkifli R. [et al.]. An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries // *Recycling*. 2021. Vol. 6, Iss. 1. Article number: 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>.
- Onyeaka H., Obileke K., Makaka G., Nwokolo N. Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging // *Polymers*. 2022. Vol. 14, Iss. 6. Article number: 1126. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061126>.
- Pereda M., Ponce A. G., Marcovich N. E., Ruseckaite R. A. [et al.]. Chitosan-gelatin composites and bi-layer films with potential antimicrobial activity // *Food Hydrocolloids*. 2011. Vol. 25, Iss. 5. P. 1372–1381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.01.001>.
- Pranoto Y., Lee C. M., Park H. J. Characterizations of fish gelatin films added with gellan and κ -carrageenan // *LWT – Food Science and Technology*. 2007. Vol. 40, Iss. 5. P. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.04.005>.
- Rajendran D. S., Venkataraman S., Jha S. K., Chakrabarty D. [et al.]. A review on bio-based polymer polylactic acid potential on sustainable food packaging // *Food Science and Biotechnology*. 2024. Vol. 33. P. 1759–1788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01543-x>.
- Ramos M., Valdés A., Beltrán A., Garrigós M. C. Gelatin-based films and coatings for food packaging applications // *Coatings*. 2016. Vol. 6, Iss. 4. Article number: 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings6040041>.
- Reji R. E., Mathew C. B., Janani V., Sabu C. S. [et al.]. A review on gelatin films and coatings for active food packaging: Functional properties and applications // *Food Innovation and Advances*. 2025. Vol. 4, Iss. 3. P. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.48130/fia-0025-0046>.
- Rivero S., García M. A., Pinotti A. Composite and bi-layer films based on gelatin and chitosan // *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 90, Iss. 4. P. 531–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.021>.
- Robles-Vargas D., Santos-Medrano G. E., Alvarado-Flores J., Pérez-Legaspi I. A. [et al.]. Accumulation of plastic waste in the natural environment and its life cycle assessment // *Environmental Hazards of Plastic Wastes. Bioremediation Approaches for Environmental Clean-up* / eds.: R. T. Kapoor, H. Treichel, J. Zdarta. Elsevier, 2025. Chapter 15. P. 235–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23599-3.00022-8>.
- Rosmawati R., Sari S. F., Asnani A., Embe W. [et al.]. Influence of sorbitol and glycerol on physical and tensile properties of biodegradable-edible film from snakehead gelatin and κ -carrageenan // *International Journal of Food Science*. 2025. Vol. 2025, Iss. 1. Article number: 7568352. DOI: <https://doi.org/10.1155/ijfo/7568352>.
- Rostamabadi H., Demirkesen I., Colussi R., Roy S. [et al.]. Recent trends in the application of films and coatings based on starch, cellulose, chitin, chitosan, xanthan, gellan, pullulan, Arabic gum, alginate, pectin, and carrageenan in food packaging // *Food Frontiers*. 2024. Vol. 5, Iss. 2. P. 350–391. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.342>.
- Serra S., Iarlari S., Tosatti E., Scandolo S. [et al.]. Dynamical and thermal properties of polyethylene by ab initio simulation // *Chemical Physics Letters*. 2000. Vol. 331, Iss. 2–4. P. 339–345. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(00\)00881-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(00)00881-2).

- Shah Y. A., Bhatia S., Al-Harrasi A., Oz F. [et al.]. Thermal properties of biopolymer films: Insights for sustainable food packaging applications // *Food Engineering Reviews*. 2024. Vol. 16. P. 497–512. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09380-8>.
- Shaikh S., Yaqoob M., Aggarwal P. An overview of biodegradable packaging in food industry // *Current Research in Food Science*. 2021. Vol. 4. P. 503–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>.
- Sheriff S. S., Yusuf A. A., Akiyode O. O., Hallie E. F. [et al.]. A comprehensive review on exposure to toxins and health risks from plastic waste: Challenges, mitigation measures, and policy interventions // *Waste Management Bulletin*. 2025. Vol. 3, Iss. 3. Article number: 100204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100204>.
- Sionkowska A., Wisniewski M., Skopinska J., Kennedy C. J. [et al.]. Molecular interactions in collagen and chitosan blends // *Biomaterials*. 2004. Vol. 25, Iss. 5. P. 795–801. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00595-7](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00595-7).
- Staroszczyk H., Pielichowska J., Sztuka K., Stangret J. [et al.]. Molecular and structural characteristics of cod gelatin films modified with EDC and TGase // *Food Chemistry*. 2012. Vol. 130, Iss. 2. P. 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.047>.
- Staroszczyk H., Sztuka K., Wolska J., Wojtasz-Pająk A. [et al.]. Interactions of fish gelatin and chitosan in uncrosslinked and crosslinked with EDC films: FT-IR study // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. Vol. 117. P. 707–712. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.044>.
- Voron'ko N. G., Derkach S. R., Kuchina Y. A., Sokolan N. I. The chitosan – gelatin (bio)polyelectrolyte complexes formation in an acidic medium // *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 138. P. 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.059>.
- Xu X.-F., Dai M.-Q., Yan J.-N., Du Y.-N. [et al.]. Comparison of the properties of composite films constructed from chitosan and gelatin from two jellyfish species // *Food Hydrocolloids*. 2025. Vol. 167. Article number: 111412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111412>.
- Zubair M., Ullah A. Recent advances in protein derived bionanocomposites for food packaging applications // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 60, Iss. 3. P. 406–434. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1534800>.

References

- Eremeeva, S. V., Sergazieva, O. D., Soprunova, O. B., Zhukova, O. I. et al. 2023. The effect of biodegradable ichthyogelatin film on the quality of meat semi-finished products during storage. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 11(3), pp. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.14529/food230308>. EDN: YUIPIF. (In Russ.)
- Kazakova, V. S., Zemlyakova, E. S. 2024. Integrated processing of collagen-containing fish raw materials. *KSTU News*, 72, pp. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-72-81-91>. (In Russ.)
- Oldyrev, D. V., Sergazieva, O. D., Yartseva, N. V., Bakhareva, A. A. 2023. Producing collagen-containing ichthyosubstance from secondary fishery resources. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, pp. 182–198. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.451>. EDN: KRZPYR. (In Russ.)
- Sergazieva, O. D., Eremeeva, S. V., Oldyrev, D. V. 2025. Justification for the extension of shelf life of products stored in a collagen-containing ichthyosubstance-based food film. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), pp. 185–204. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.651>. EDN: XEUJZG. (In Russ.)
- Abugoch, L. E., Tapia, C., Villamán, M. C., Yazdani-Pedram, M. et al. 2011. Characterization of quinoa protein-chitosan blend edible films. *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp. 879–886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.008>.
- Al-Hassan, A. A., Norziah, M. H. 2012. Starch-gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 26(1), pp. 108–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>.
- Cao, L., Liu, W., Wang, L. 2018. Developing a green and edible film from Cassia gum: The effects of glycerol and sorbitol. *Journal of Cleaner Production*, 175, pp. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.064>.
- Derkach, S. R., Kuchina, Y. A., Baryshnikov, A. V., Kolotova, D. S. et al. 2019. Tailoring cod gelatin structure and physical properties with acid and alkaline extraction. *Polymers*, 11(10). Article number: 1724. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101724>.
- Derkach, S., Voron'ko, N., Bordiyan, V., Dyakina, T. et al. 2025. Influence of chitosan on fish gelatin hydrogel: Rheological properties and microstructure. *Polysaccharides*, 6(4). Article number: 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6040110>.
- Gómez-Guillén, M. C., Pérez-Mateos, M., Gómez-Estaca, J., López-Caballero, E. et al. 2009. Fish gelatin: A renewable material for developing active biodegradable films. *Trends in Food Science & Technology*, 20(1), pp. 3–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.10.002>.
- He, B., Gao, Y., Lou, W., Wang, J. et al. 2025. Biodegradable food packaging films: Material source, mechanical and water vapor barrier properties, and improvement strategies – A comprehensive review. *Food Research International*, 211. Article number: 116431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116431>.

- Hosseini, S. F., Rezaei, M., Zandi, M., Ghavi, F. F. 2013. Preparation and functional properties of fish gelatin-chitosan blend edible films. *Food Chemistry*, 136(3–4), pp. 1490–1495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.081>.
- Jridi, M., Hajji, S., Ben Ayed, H., Lassoued, I. et al. 2014. Physical, structural, antioxidant and antimicrobial properties of gelatin-chitosan composite edible films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 67, pp. 373–379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.03.054>.
- Kumar, A., Kumar, A., Wei, S., Chopra, S. et al. 2025. Biodegradable and smart packaging films for food quality and safety: A review. *Applied Food Research*, 5(2). Article number: 101491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101491>.
- Layne, E. 1957. Spectrophotometric and turbidimetric methods for measuring proteins. *Methods in Enzymology*. Academic Press, 3, pp. 447–454. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(57\)03413-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(57)03413-8).
- Li, C., Yang, Y., Zhang, R., Wang, J. et al. 2025. Chitosan-gelatin composite hydrogel antibacterial film for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 285. Article number: 138330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138330>.
- Liu, X., Qin, Z., Ma, Y., Liu, H. et al. 2023. Cellulose-based films for food packaging applications: Review of preparation, properties, and prospects. *Journal of Renewable Materials*, 11(8), pp. 3203–3225. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.027613>.
- Liyanapathirana, A., Dassanayake, R. S., Gamage, A., Karri, R. R. et al. 2023. Recent developments in edible films and coatings for fruits and vegetables. *Coatings*, 13(7). Article number: 1177. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13071177>.
- Ma, X., Qiao, C., Zhang, J., Xu, J. 2018. Effect of sorbitol content on microstructure and thermal properties of chitosan films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, pp. 1294–1297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.060>.
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R. et al. 2021. An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1). Article number: 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>.
- Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., Nwokolo, N. 2022. Current research and applications of starch-based biodegradable films for food packaging. *Polymers*, 14(6). Article number: 1126. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061126>.
- Pereda, M., Ponce, A. G., Marcovich, N. E., Ruseckaite R. A. et al. 2011. Chitosan-gelatin composites and bi-layer films with potential antimicrobial activity. *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp. 1372–1381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.01.001>.
- Pranoto, Y., Lee, C. M., Park, H. J. 2007. Characterizations of fish gelatin films added with gellan and κ -carrageenan. *LWT – Food Science and Technology*, 40(5), pp. 766–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.04.005>.
- Rajendran, D. S., Venkataraman, S., Jha, S. K., Chakrabarty, D. et al. 2024. A review on bio-based polymer polylactic acid potential on sustainable food packaging. *Food Science and Biotechnology*, 33, pp. 1759–1788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01543-x>.
- Ramos, M., Valdés, A., Beltrán, A., Garrigós, M. C. 2016. Gelatin-based films and coatings for food packaging applications. *Coatings*, 6(4). Article number: 41. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings6040041>.
- Reji, R. E., Mathew, C. B., Janani, V., Sabu, C. S. et al. 2025. A review on gelatin films and coatings for active food packaging: Functional properties and applications. *Food Innovation and Advances*, 4(3), pp. 423–436. DOI: <https://doi.org/10.48130/fia-0025-0046>.
- Rivero, S., García, M. A., Pinotti A. 2009. Composite and bi-layer films based on gelatin and chitosan. *Journal of Food Engineering*, 90(4), pp. 531–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.021>.
- Robles-Vargas, D., Santos-Medrano, G. E., Alvarado-Flores, J., Pérez-Legaspi, I. A. et al. 2025. Accumulation of plastic waste in the natural environment and its life cycle assessment. In *Environmental Hazards of Plastic Wastes. Bioremediation Approaches for Environmental Clean-up*. Eds.: R. T. Kapoor, H. Treichel, J. Zdarta. Elsevier, Chapter 15, pp. 235–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23599-3.00022-8>.
- Rosmawati, R., Sari, S. F., Asnani, A., Embe, W. et al. 2025. Influence of sorbitol and glycerol on physical and tensile properties of biodegradable-edible film from snakehead gelatin and κ -carrageenan. *International Journal of Food Science*, 2025(1). Article number: 7568352. DOI: <https://doi.org/10.1155/ijfo/7568352>.
- Rostamabadi, H., Demirkesen, I., Colussi, R., Roy, S. et al. 2024. Recent trends in the application of films and coatings based on starch, cellulose, chitin, chitosan, xanthan, gellan, pullulan, Arabic gum, alginate, pectin, and carrageenan in food packaging. *Food Frontiers*, 5(2), pp. 350–391. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.342>.
- Serra, S., Iarlori, S., Tosatti, E., Scandolo, S. et al. 2000. Dynamical and thermal properties of polyethylene by ab initio simulation. *Chemical Physics Letters*, 331(2–4), pp. 339–345. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(00\)00881-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(00)00881-2).
- Shah, Y. A., Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Oz, F. et al. 2024. Thermal properties of biopolymer films: Insights for sustainable food packaging applications. *Food Engineering Reviews*, 16, pp. 497–512. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09380-8>.

- Shaikh, S., Yaqoob, M., Aggarwal, P. 2021. An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*, 4, pp. 503–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005>.
- Sheriff, S. S., Yusuf, A. A., Akiyode, O. O., Hallie, E. F. et al. 2025. A comprehensive review on exposure to toxins and health risks from plastic waste: Challenges, mitigation measures, and policy interventions. *Waste Management Bulletin*, 3(3). Article number: 100204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100204>.
- Sionkowska, A., Wisniewski, M., Skopinska, J., Kennedy, C. J. et al. 2004. Molecular interactions in collagen and chitosan blends. *Biomaterials*, 25(5), pp. 795–801. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00595-7](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00595-7).
- Staroszczyk, H., Pielichowska, J., Sztuka, K., Stangret, J. et al. 2012. Molecular and structural characteristics of cod gelatin films modified with EDC and TGase. *Food Chemistry*, 130(2), pp. 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.047>.
- Staroszczyk, H., Sztuka, K., Wolska, J., Wojtasz-Pajak, A. et al. 2014. Interactions of fish gelatin and chitosan in uncrosslinked and crosslinked with EDC films: FT-IR study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 117, pp. 707–712. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.044>.
- Voron'ko, N. G., Derkach, S. R., Kuchina, Y. A., Sokolan, N. I. 2016. The chitosan – gelatin (bio)polyelectrolyte complexes formation in an acidic medium. *Carbohydrate Polymers*, 138, pp. 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.059>.
- Xu, X.-F., Dai, M.-Q., Yan, J.-N., Du, Y.-N. et al. 2025. Comparison of the properties of composite films constructed from chitosan and gelatin from two jellyfish species. *Food Hydrocolloids*, 167. Article number: 111412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111412>.
- Zubair, M., Ullah, A. 2020. Recent advances in protein derived bionanocomposites for food packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(3), pp. 406–434. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1534800>.

Сведения об авторах

Колотова Дарья Сергеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Daria S. Kolotova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher;
e-mail: kolotovads@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Воропаева Светлана Олеговна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, мл. науч. сотрудник;
e-mail: voropaevaso@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0230-2690>

Svetlana O. Voropaeva – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Junior Researcher;
e-mail: voropaevaso@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0230-2690>

Петрова Людмила Анатольевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: petrovala@mauniver.ru

Liudmila A. Petrova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: petrovala@mauniver.ru