

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2632>
<https://elibrary.ru/PBLDTL>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оценка физико-химических и биотехнологических свойств материалов из морского коллагена



Ю. В. Куликова^{1,*}, Д. И. Спорышева², М. А. Ташкинов²,
С. Ю. Носкова¹, О. О. Бабич¹

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта^{ROR}, Калининград, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет^{ROR}, Пермь, Россия

Поступила в редакцию: 05.02.2026

Принята после рецензирования: 24.02.2026

Принята к публикации: 03.03.2026

*e-mail: stas-asp@mail.ru

© Ю. В. Куликова, Д. И. Спорышева, М. А. Ташкинов,

С. Ю. Носкова, О. О. Бабич, 2026



Аннотация.

Ввиду системных проблем агропромышленного сектора производственные мощности не соответствуют растущим объемам спроса на мясную продукцию, что создает предпосылки для возникновения ее дефицита в краткосрочной перспективе. Одним из стратегических направлений для обеспечения белковой безопасности населения является развитие технологий культивированного мяса. Ключевым элементом в его биопроизводстве выступает трехмерный каркас (скаффолд), от характеристик которого напрямую зависят структурно-механические свойства конечного продукта. В настоящее время сохраняется актуальная задача поиска и разработки материалов для скаффолдов, обеспечивающих формирование продукта с удовлетворительными органолептическими и текстурными характеристиками. Цель исследования – комплексный анализ физико-химических свойств морского коллагена, а также оценка его биотехнологического потенциала и потенциала гелей на его основе в качестве перспективного сырья для создания каркасов культивируемого мяса.

Объект исследования – коллаген из биомассы медузы *Aurelia aurita* и кожи обыкновенного судака (*Sander lucioperca*), полученный методом кислотной экстракции. Для изучения физико-химических свойств применяли электрофоретический метод Лэмли, метод капиллярного электрофореза, ИК-Фурье спектроскопию, МТТ-анализ для оценки выживания клеточных культур, 3D-печать на биопринтере.

Показано, что изучаемый коллаген состоит из двух полипептидных цепей (α -цепей и β -цепей) с молекулярной массой 240 кДа (биомасса *A. aurita*) и 220 кДа (кожа *S. lucioperca*). Выявлено, что коллаген имеет оптимальное значение изоэлектрической точки, необходимой для протекания процессов роста и развития культуры клеток. Благодаря наличию в составе коллагена гидроксипролина, глицина, пролина, обеспечивается жесткость молекулы и ее каркасные функции. Изучаемый коллаген характеризуется биосовместимостью и отсутствием цитотоксического эффекта.

Морской коллаген, полученный из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca*, можно использовать в качестве биоматериала для создания каркасов, необходимых для производства культивируемого мяса. С практической точки зрения результаты настоящего исследования позволят расширить ассортимент биоматериалов, подходящих для технологий XXI в., включая инженерные технологии и технологии получения культивированного мяса.

Ключевые слова. Коллаген, морской коллаген, биоматериал, скаффолд, технология культивируемого мяса, *Aurelia aurita*, *Sander lucioperca*, биосовместимость, МТТ-анализ

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2023-601 (доб. регистрационный № 13.2251.21.0219).

Для цитирования: Куликова Ю. В., Спорышева Д. И., Ташкинов М. А., Носкова С. Ю., Бабич О. О. Оценка физико-химических и биотехнологических свойств материалов из морского коллагена. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 1 С. 190–202. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2632>

Physicochemical and Biotechnological Properties of Marine Collagen Materials



Yuliya V. Kulikova^{1,*}, Daria I. Sporysheva²,
Mikhail A. Tashkinov², Svetlana Yu. Noskova¹, Olga O. Babich¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University^{ROR}, Kaliningrad, Russia

² Perm National Research Polytechnic University^{ROR}, Perm, Russia

Received: 05.02.2026

Revised: 24.02.2026

Accepted: 03.03.2026

*e-mail: stas-asp@mail.ru

© Yu. V. Kulikova, D. I. Sporysheva, M. A. Tashkinov, S. Yu. Noskova,

O. O. Babich, 2026



Abstract.

As the current agricultural production capacity fails to meet the growing demand for meat products, the global market might soon face meat shortages. Cultured, or cultivated, meat is a prospective solution to protein security challenges. Its bioproduction relies on a three-dimensional scaffold that defines the structural and mechanical properties of the final product. The food science is seeking new scaffolding materials that would yield cultured meat with targeted sensory and textural properties. This article describes the physical and chemical properties of marine collagen to evaluate its biotechnological potential as raw material for cultured meat scaffolds.

The study investigated collagen derived from jellyfish (*Aurelia aurita*) and zander skin (*Sander lucioperca*) obtained by acid extraction. The physicochemical characterization involved the Laemmli electrophoretic method, capillary electrophoresis, FTIR spectroscopy, MTT assay, and 3D bioprinting.

The collagen consisted of two polypeptide chains (α and β) with molecular weights of 240 kDa (*A. aurita*) and 220 kDa (*S. lucioperca*). The samples exhibited an optimal isoelectric point, which supported cell culture growth and development. Hydroxyproline, glycine, and proline provided molecules with robust scaffolding properties. The marine collagen demonstrated biocompatibility but no cytotoxicity.

The collagen samples from *A. aurita* biomass and *S. lucioperca* skin demonstrated good prospects as biomaterial for scaffolds in cultured meat production.

Keywords. Collagen, marine collagen, biomaterial, scaffold, cultured meat, *Aurelia aurita*, *Sander lucioperca*, biocompatibility, MTT analysis

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, contract no. 075-15-2023-601 (13.2251.21.0219).

For citation: Kulikova YuV, Sporysheva DI, Tashkinov MA, Noskova SYu, Babich OO. Physicochemical and Biotechnological Properties of Marine Collagen Materials. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(1):190–202. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-1-2632>

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост численности населения, что создает как новые возможности, так и беспрецедентные вызовы для человечества. Согласно последним статистическим прогнозам, мировое население к середине XXI в. увеличится на 38,6 % относительно текущей численности, что в свою очередь приведет к росту потребления растительного и животного продовольствия [1, 2]. При этом, ввиду системных проблем агропромышленного комплекса, включающих недостаточность кормовой базы, низкую производственную эффективность, высокий уровень создаваемого сельским хозяйством

экологического воздействия, существующие мощности не соответствуют прогнозируемому росту потребности в животном сырье, в частности в мясной продукции [1, 3, 4]. Для предотвращения дефицита протеина в рационе человека и минимизации риска развития патологий, обусловленных питанием и ассоциированных с белковой недостаточностью, требуется активизация развития перспективного научно-технологического направления – производства культивируемого мяса [5]. Данная технология представляет собой этическую альтернативу традиционному животноводству, характеризующуюся существенно сниженной экологической нагрузкой: сокращением выбросов

парниковых газов, минимизацией использования земельных и водных ресурсов, а также уменьшением количества задействованных сельскохозяйственных животных [4, 6]. Ключевым технологическим преимуществом производства культивированного мяса является отсутствие необходимости применения антибиотиков на стадии получения конечного продукта [4, 5]. Фундаментальным элементом в процессе биопроизводства выступает трехмерный каркас (скаффолд), который обеспечивает формирование необходимой гистоархитектоники продукта, адгезию, пролиферацию и последующую дифференцировку клеточных культур [4].

При конструировании биологических каркасов рассматривается широкий спектр природных полимерных молекул бактериального, растительного и животного происхождения, каждый из которых характеризуется уникальным комплексом функциональных преимуществ и технологических ограничений [4]. На текущем этапе развития технологии ключевой нерешенной проблемой остается отсутствие биоматериала, позволяющего получить конечный мясной продукт с удовлетворительными структурными и механическими характеристиками, сопоставимыми с традиционным мясом [7]. В связи с этим при построении технологии производства культивированного мяса приобретает особую актуальность задача разработки съедобных натуральных скаффолдов, способных формировать естественную трехмерную архитектуру, обеспечивать ретенцию влаги и стимулировать пролиферацию клеточных культур *in vitro* [7–9]. Согласно данным литературного анализа [7], основные научные усилия до настоящего времени были сосредоточены на оптимизации каркасов для интенсификации клеточного роста и улучшения физических параметров культивируемой ткани, тогда как целенаправленная модификация структурно-механических свойств конечного продукта посредством управления химической структурой каркасных материалов остается слабо проработанной. В данном контексте приобретает актуальность системный скрининг природных материалов по комплексу физико-химических и реологических показателей. Это необходимо для последующего создания искусственного мяса с воспроизводимыми и удовлетворительными структурными, механическими и органолептическими свойствами. В качестве перспективного базиса для создания скаффолдов нового поколения в аддитивном биопроизводстве культивированного мяса предлагается рассмотреть коллаген морского происхождения. Каркасные структуры на основе морского коллагена демонстрируют улучшенные резорбционные характеристики и сниженный аллергенный потенциал по сравнению с аналогами животного происхождения, а также минимизируют риски передачи зоонозных инфекций [10].

Коллаген представляет собой высокомолекулярный структурный белок внеклеточного матрикса [11–13],

образованный тройной спиралью из трех полипептидных α -цепей: две из них идентичны по аминокислотной последовательности, третья имеет отличный состав [11]. Посредством самосборки данные молекулы агрегируются в микрофибриллы, которые организуются в фибриллы, формирующие биологические волокна и пучки, что определяет его ключевую архитектурную функцию коллагена [11]. Биомолекула характеризуется высокой биоразлагаемостью, выраженной биосовместимостью и низкой иммуногенностью [4, 11], при этом коллаген морского происхождения демонстрирует наивысшие показатели биодоступности и безопасности [14].

Как отмечают R. Socrates *et al.* [11], коллаген обеспечивает эффективную адгезию, рост и пролиферацию клеточных культур, что в совокупности с превосходными физико-химическими характеристиками определяет его высокий потенциал в качестве каркасного материала. Технологическая пластичность коллагена позволяет получать на его основе материалы, находящиеся в разнообразных агрегатных состояниях (волокна, растворы, гели, порошки) и композитные материалы [11, 15–17], что обусловило его широкое применение в пищевой промышленности, биотехнологии, а также косметологии и регенеративной медицине на протяжении последних десятилетий [15–17]. Однако сохраняется существенный пробел в фундаментальных и прикладных знаниях о биотехнологических свойствах и методах модификации именно морского коллагена, определяющих перспективы его интеграции в технологии производства культивированного мяса.

В связи с этим цель исследования – комплексный анализ физико-химических параметров морского коллагена и оценка биотехнологического потенциала белка и гелей на его основе как перспективного сырья для конструирования скаффолдов следующего поколения в биопроизводстве культивированного мяса.

Объекты и методы исследования

Для реализации научно-исследовательской работы использовали два вида нативного кислоторастворимого коллагена, полученного из биомассы медузы *Aurelia aurita* (Калининград, Россия) и кожи обыкновенного судака *Sander lucioperca* (Калининград, Россия).

Коллаген из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* получали методом кислотной экстракции, описанным в работе [10]. Для этого на первом этапе экстракции биомассу *A. aurita* и кожу *S. lucioperca* промывали последовательно сначала дистиллированной водой в течение 24 ч, потом 0,1 М NaOH в течение 24 ч. Данная стадия позволила очистить биомассу от лишних солей и загрязняющих веществ. Затем биомассу измельчали ручным методом до образования кусочков размером 5–10 мм. Измельченную массу заливали 0,5 М уксусной кислоты в соотношении 1:10 (мас./об.). Полученную смесь оставляли на 48 ч при температуре 4 °С и постоянном помешивании для экстракции.

На следующей стадии экстракт отделяли от биомассы методом фильтрования. Процесс фильтрации вели через хлопчатобумажную ткань (медицинская стерильная марля, плотность 36,0 г/м²).

Для увеличения выхода коллагена процесс экстракции уксусной кислотой повторяли дважды. Полученные экстракты объединяли. К экстракту добавляли в сухом виде NaCl до конечной концентрации 0,9 М. Осадки собирали после центрифугирования при 3900 об/мин в течение 7 мин и растворяли в 0,5 М уксусной кислоты, диализировали против 0,1 М уксусной кислоты и дистиллированной воды в течение трех дней, а затем лиофилизировали [10] с использованием лиофильной сушки Иней-6 (ИБП РАН, Россия).

Для подтверждения нативной структуры коллагена изучали следующие показатели: молекулярную массу, изоэлектрическую точку и аминокислотный состав. В частности, данный метод позволяет выявить наличие характерных для коллагена аминокислот (гидроксипролина, глицина и пролина).

Молекулярную массу коллагена изучали электрофоретическим методом с использованием 7,5 % разделяющего полиакриламидного геля и 4 % концентрирующего геля [18]. Образец коллагена растворяли в 0,02 М натрий-фосфатном буфере (рН 7,2), содержащем 1 % SDS и 3,5 М мочевины. Затем полученную смесь смешивали с буфером для образцов Laemmli (Bio-Rad) в соотношении 1:1 с β -меркаптоэтанолом и без него и нагревали в течение 5 мин при температуре 95 °С. Каждый образец (20 мкг белка) загружали в лунку и запускали напряжение. Электрофорез проводили при напряжении 120 В в течение 90–120 мин [18].

Далее белковые полосы окрашивали путем выдержки в растворе красителя кумасси бриллиантового синего R-250. Для оценки приблизительной молекулярной массы образцов коллагена использовался высокомолекулярный предварительно окрашенный маркер 10–250 кДа (Servicebio, Китай).

Изоэлектрическую точку коллагена определяли путем приготовления кислых и щелочных растворов с различным рН, в которые вносили навески белка. Смеси перемешивали и инкубировали при комнатной температуре в течение 40 мин.

Дзета-потенциал растворов коллагена измеряли с помощью анализатора дзета-потенциала Photocor Compact-Z (ООО «Фотокор», Россия). Аликвоты объемом 2 мл переносили в кюветы с помощью универсальных электродов. Значение рН растворов регулировали 0,1 моль/л соляной кислотой или 0,1 моль/л гидроксидом натрия. Измерения дзета-потенциала проводились в пяти экземплярах для каждого раствора

Изучение аминокислотного состава нативного коллагена проводили строго по методу, описанному в методике М-04-38-2009 «Определение протеиногенных аминокислот в комбикормах и сырье». Для измерения использовали систему капиллярного электрофореза 105 М (ООО «Льюмэкс», Россия).

Для исследования применяли первичные фибробласты *Bos taurus* из биоптата кожи, полученного из области уха животного. Клетки высевали из расчета 20000 клеток на лунку в 24-луночный планшет. Клетки культивировали в течение 24 ч в присутствии образцов коллагена для оценки цитотоксических свойств коллагена и оценку влияния морского коллагена на пролиферацию клеток. После инкубации клетки отделяли от поверхности с помощью раствора трипсина, который затем нейтрализовали. Клеточную суспензию набирали пипеткой и смешивали с 4 % раствором трипанового синего (BD) в соотношении 1:1, инкубировали с красителем в течение 1–3 мин; в течение указанного времени происходило окрашивание нежизнеспособных клеток с поврежденными мембранами. Общее количество клеток, а также количество живых и мертвых клеток подсчитывали с использованием счетчика Luna-II (Logos Biosystems, Южная Корея).

Для получения гелей готовили раствор коллагена с концентрацией 6 мг/мл в 0,5 М уксусной кислоты. Значение рН было скорректировано до 8,0 по универсальной индикаторной бумаге с 5 М раствора гидроксида натрия при перемешивании при температуре 4 °С в течение 1 ч. Далее инкубировали 30 мин при 37 °С до гелеобразования [19–21]. В качестве гелеотвердителя добавляли однопроцентный раствор CaCl₂.

Далее формировали решеточные образцы из гелей на основе коллагена. Для этого осуществляли 3D-печать на биопринтере Rokit Dr. INVIVO 4D2 (Rokit, Южная Корея). Процесс печати вели при температуре 7 °С, соплом диаметром 0,4 мм. Для построения G-code использовали программное обеспечение NewCreatorK (Rokit, Южная Корея).

ИК-спектры коллагена и полученных высушенных продуктов снимались с использованием приставки НПВО на спектрометре ФСМ 2022 (Инфраспек, Россия) в диапазоне от 4000 до 400 см⁻¹ при разрешении 4 см⁻¹.

Данные были подвергнуты дисперсионному анализу с использованием программы Statistica 10.0 (StatSoft Inc, США). Для выявления выборок, существенно различающихся друг от друга, был проведен апостериорный анализ (тест Дункана).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы были изучены основные физико-химические свойства коллагена, выделенного из биомассы *Aurelia aurita* и кожи *Sander lucioperca*, а также подтверждена его нативная структура и высокомолекулярная природа. Молекулярную массу коллагена определяли методом электрофореза (рис. 1).

Согласно полученным данным, изучаемые образцы коллагена *A. aurita* и *S. lucioperca* состоят из двух цепей (α -цепей и β -цепей). Молекулярная масса коллагена *A. aurita* составила 240 кДа, коллагена кожи *S. Lucioperca* – 220 кДа.

Другим показателем, характеризующим индивидуальность белка, является изоэлектрическая точка,

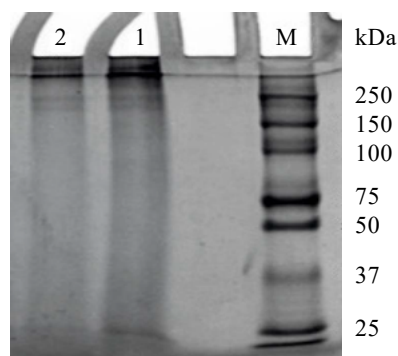


Рисунок 1. Электрофореграмма коллагена: М – маркер; 1 – нативный коллаген *Aurelia aurita*; 2 – нативный коллаген *Sander lucioperca*

Figure 1. Electropherogram of collagen: M – marker; 1 – native collagen derived from *Aurelia aurita*; 2 – native collagen derived from *Sander lucioperca*

величина которой зависит от аминокислотного состава и структуры молекулы [22, 23]. Значения изоэлектрической точки для коллагена *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* составили 5,2 и 4,0 соответственно (рис. 2).

Известно, что коллаген в своей аминокислотной последовательности содержит глицин, пролин и гидроксипролин [24]. По наличию данных аминокислот в полипептидной цепи можно косвенно судить о том, что белок является коллагеном. Результаты аминокислотного состава, представленные на рисунке 3 и в таблице 1, свидетельствуют о том, что изучаемый белок содержит в своем составе значительное количество искомым аминокислот (глицин, пролин) в количестве до 24 %.

Гидроксипролин обнаружить не удалось, поскольку стандарт данной аминокислоты для проведения калибровки отсутствовал. Вместе с тем совокупность физико-химических показателей (аминокислотный состав, изоэлектрическая точка, молекулярная масса) позволяет заключить, что из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* был выделен нативный коллаген.

На следующем этапе проводили оценку биотехнологического потенциала коллагенов по их способности влиять на степень пролиферации и жизнеспособность клеток (табл. 2). В ходе исследования установлено, что фибробласты коровы растут в присутствии коллагена в течение первых 24 ч практически одинаково: подсчет живых и мертвых клеток методом снятия их с поверхности и окрашивания трипановым синим показал, что во всех вариантах доля живых клеток превышает 70 %.

Далее из полученного коллагена были сформированы гели (рис. 4) для последующего использования в производстве клеточных каркасов методом 3D-печати.

В ходе исследования было выявлено, что гель на основе коллагенов из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* достаточно вязкий, способен сохранять форму и структуру. Таким образом, он может быть использован

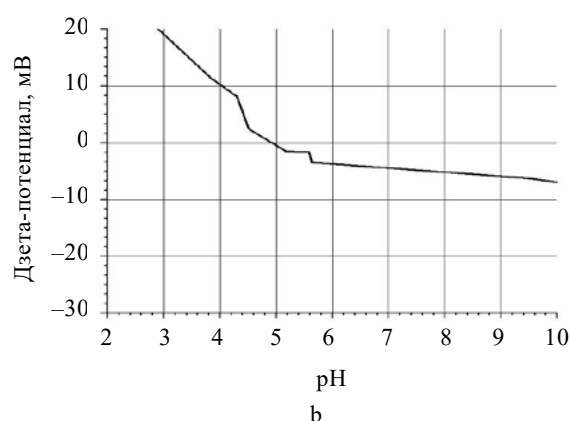
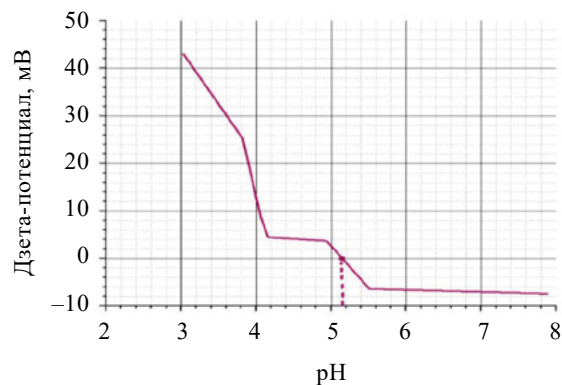


Рисунок 2. Зета-потенциал коллагена: а – *Aurelia aurita*; б – *Sander lucioperca*

Figure 2. Zeta potential of collagen: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

для печати на 3D-биопринтере и создания каркасов для культивируемого мяса. Для подтверждения этой гипотезы на биопринтере Rokit Dr. INVIVO 4D2 проводили 3D-печать (рис. 5). В ходе исследования выявлено, что после заливания гели из коллагена медузы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* изменяют объем (происходит усадка), нити утончаются, что накладывает сложности в производстве объектов необходимых размеров и требует учета коэффициентов масштабирования.

Для исследования химической структуры сформированных гелей были получены ИК-спектры (рис. 6). На всех спектрах наблюдается пик амид А в области 3300–3500 cm^{-1} , соответствующий валентному колебанию N–H в структуре белковой молекулы. В области 1600–1700 cm^{-1} пик характеризует валентные колебания группы C=O (амид I). Другая характеристическая полоса белковых спектров – амид II – располагается вблизи области 1510–1570 cm^{-1} . Наличие данных пиков, независимо от их интенсивности, подтверждает коллагеновую природу исследуемого образца.

Проведенный комплексный анализ свидетельствует о перспективности использования коллагена, выделенного из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca*, в качестве основы для формирования гелевых систем, пригодных

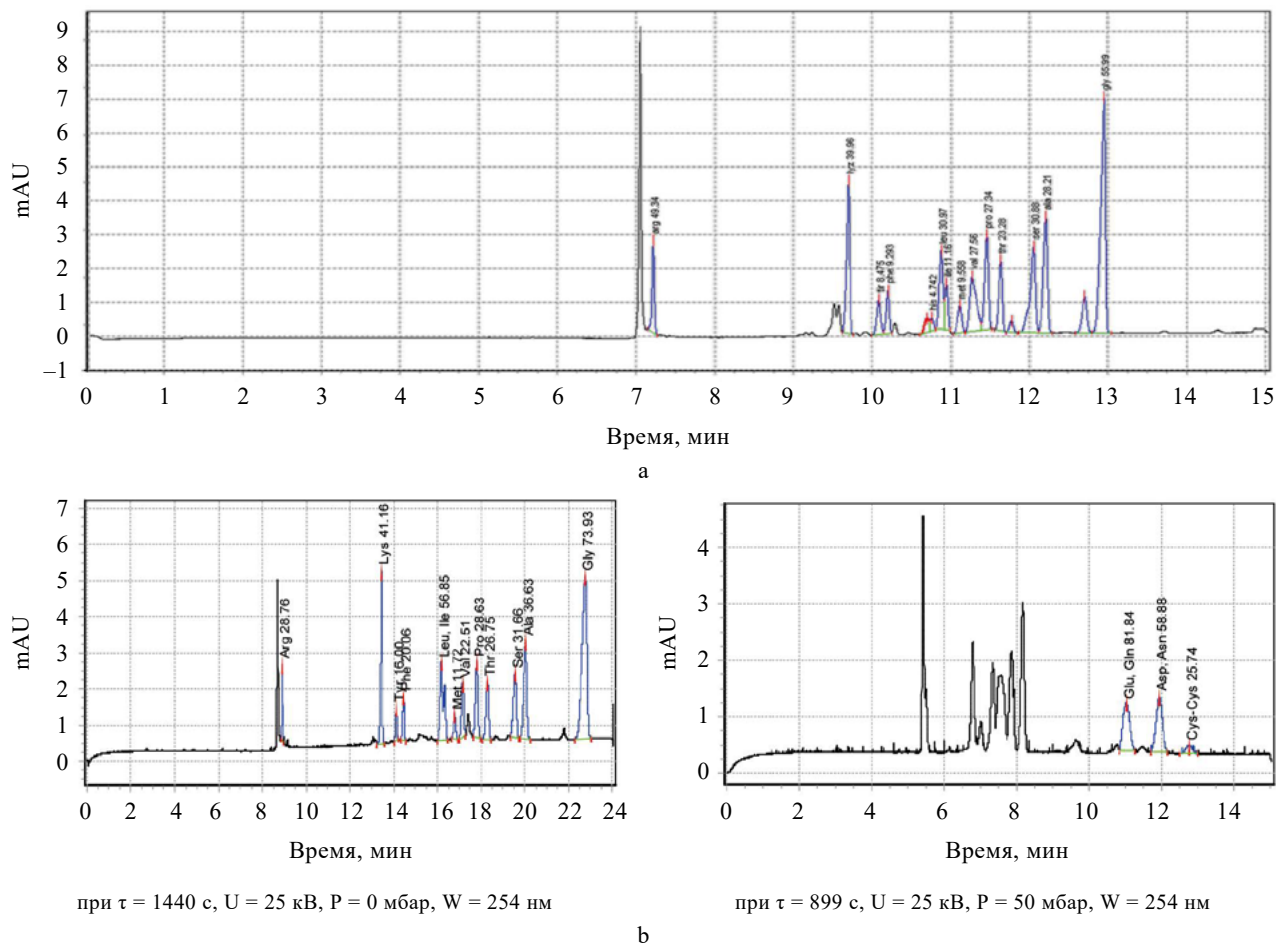


Рисунок 3. Электрофореограмма коллагена: а – *Aurelia aurita*; б – *Sander lucioperca*

Figure 3. Electropherogram of collagen: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Таблица 1. Количественное содержание аминокислот, %

Table 1. Quantitative content of amino acids, %

Аминокислота	Коллаген <i>Aurelia aurita</i>	Коллаген <i>Sander lucioperca</i>
Валин (Val)	2,76 ± 0,56	2,20 ± 0,90
Пролин (Pro)	2,73 ± 0,64	2,80 ± 0,70
Треонин (Thr)	2,33 ± 0,42	2,60 ± 1,00
Серин (Ser)	3,09 ± 0,80	3,10 ± 0,80
Аланин (Ala)	2,82 ± 0,65	3,60 ± 0,90
Глицин (Gly)	5,60 ± 1,02	7,20 ± 2,50
Цистин (Cys)	–	2,40 ± 1,20
Аспарагиновая кислота + аспарагин (Asp)	–	5,50 ± 2,20
Глутаминовая кислота + глутамин (Glu)	–	8,00 ± 3,00

Таблица 2. Процент живых клеток после 24 ч роста в присутствии образцов коллагена

Table 2. Living cell count after 24 h of growth with collagen samples

Образец	Живые клетки, %
Коллаген из биомассы <i>Aurelia aurita</i>	80,67 ± 0,58
Коллаген из кожи <i>Sander lucioperca</i>	79,85 ± 0,96
Контроль	82,44 ± 0,58

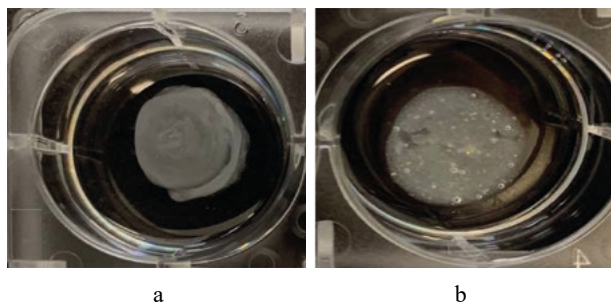
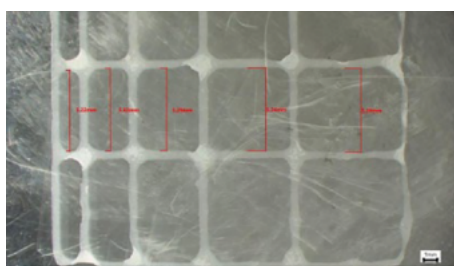
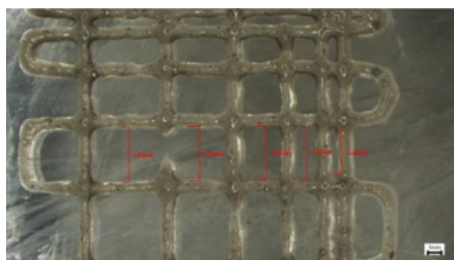


Рисунок 4. Процесс гелеобразования коллагена:
a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Figure 4. Collagen gelation: a – *Aurelia aurita*;
b – *Sander lucioperca*



a

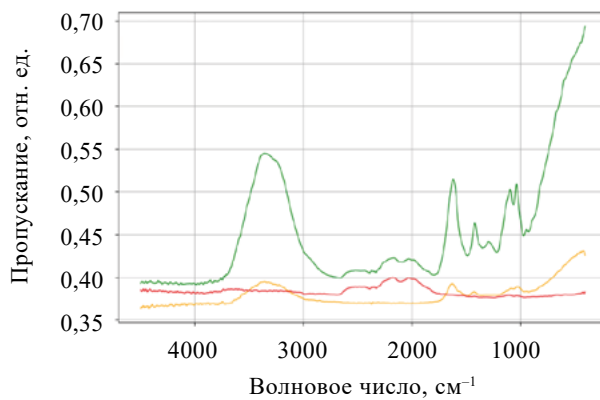


b

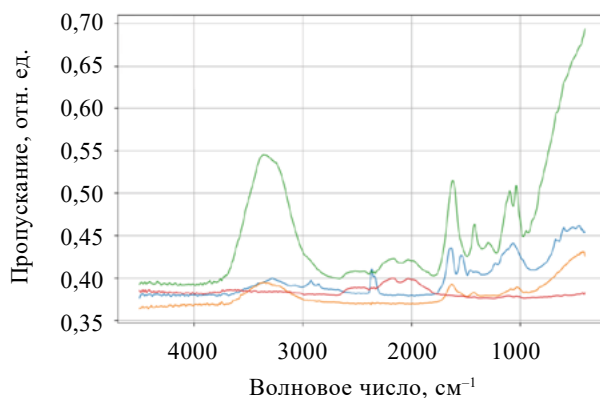
Рисунок 5. Образованные геометрические фигуры при 3D-печати с помощью чернил из коллагена:
a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Figure 5. Geometric shapes formed during 3D-printing using collagen ink: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

для создания биологических каркасов в биопроизводстве культивированного мяса. Согласно данным, полученным электрофоретическими методами, нативный коллаген из указанных источников характеризуется наличием двух полипептидных цепей (α - и β -цепей) с молекулярной массой приблизительно 240 кДа для образца *A. aurita* и 22 кДа для образца, выделенного из кожи *S. lucioperca* (рис. 1). Достоверность данных результатов подтверждается исследованиями других авторов [25–27]. В частности, К. Weber *et al.* [25] отмечают, что электрофоретический метод обеспечивает высокую степень точности при определении молекулярной массы полипептидов. Р. Kittiphattanabawon *et al.* [27] методом электрофореза установили, что коллаген



a



b

- Коллаген
- Коллаген:Альгинат натрия 1,0:0,5
- Коллаген:Альгинат натрия 1,0:1,0
- Коллаген:Альгинат натрия 1,0:2,0

Рисунок 6. Спектры поглощения гелей на основе коллагена: a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

Figure 6. Absorption spectra of collagen-based gels:
a – *Aurelia aurita*; b – *Sander lucioperca*

медузы *Chrysaora sp.* представлен тремя пептидными цепями: α -цепью ($\alpha 1$) и двумя димерными β -цепями с молекулярной массой в диапазоне от 137 до 241 кДа. Подтверждено, что коллаген, экстрагированный из морских рыб, включая *S. lucioperca*, может состоять из двух полипептидных цепей ($\alpha 1$ и $\alpha 2$) с молекулярной массой, варьирующейся от 97,0 до 126 кДа [28]. Электрофорез в полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия в сочетании со спектральным анализом в УФ-видимой области позволил идентифицировать в коже *S. lucioperca* коллаген I типа, состоящий из двух различных α -цепей ($\alpha 1$ и $\alpha 2$) с высокой молекулярной массой, близкой к 220 кДа [29], что коррелирует с полученными в настоящем исследовании данными. Таким образом, результаты электрофоретического анализа подтверждают, что примененный метод кислотной экстракции позволил получить нативный, неденатурированный коллаген. Это является важным условием для дальнейшего изучения его функциональных свойств и проверки

гипотезы о целесообразности его применения в качестве сырьевого компонента для производства биологических каркасов в технологии культивированного мяса.

О сохранении нативной структуры белка может говорить и его изоэлектрическая точка (pI), т. к. известно, что значение pI зависит только от аминокислотного состава белка. Значение pI является точкой сингулярности на кривой титрования, соответствующей рН раствора, при котором суммарный поверхностный заряд, а значит и подвижность белка равны нулю [30]. Этот параметр регулярно указывается в базах данных белков и может служить косвенным предиктором при выборе оптимального значения рН для культивирования клеток при разработке технологий культивированного мяса [31]. Именно поэтому в данном исследовании были проведены измерения изоэлектрической точки коллагена, выделенного из морских организмов. Согласно эмпирическим данным (рис. 2), изоэлектрическая точка коллагена *A. aurita* составила 5,20; для коллагена *S. lucio-perca* – 4,9. Поскольку значение изоэлектрической точки зависит от способа выделения макромолекулы, полученное в настоящем исследовании значение pI, сопоставимое с литературными данными, свидетельствует о том, что выделенный образец представляет собой нативный коллаген [32]. Так например, изоэлектрическая точка коллагена медузы *Acromitus hardenbergi* варьируется в интервале 4,46–5,40 [32], что зависит от метода, с помощью которого экстрагирован коллаген. Согласно данным, представленным в работе E. Balıkcı *et al.* [33], коллаген, выделенный из *A. aurita*, характеризуется значением pI 4,46. Доказано, что коллаген с изоэлектрической точкой между 4,0 и 5,5 демонстрирует лучшую биосовместимость при физиологическом рН [34, 35], следовательно, на нем активнее происходит рост и развитие клеток, в т. ч. стволовых и мышечных стволовых клеток [36–38]. Производство культивированного мяса основано на использовании мышечных стволовых клеток, которые расположены на базальной пластинке мышечных волокон – структурной единице мышечной ткани [36, 37]. Таким образом, коллаген морского происхождения благодаря низкому значению изоэлектрической точки может быть рассмотрен в качестве перспективного сырья для производства каркасов, применяемых в технологии культивируемого мяса.

Характерной особенностью коллагена является его уникальный аминокислотный состав, ключевыми элементами которого выступают глицин, пролин и специфическая для этого белка аминокислота – гидроксипролин [39]. Гидроксипролин, образующийся в результате посттрансляционной модификации пролина после сборки полипептидной цепи, играет решающую роль в стабилизации тройной спирали коллагена [40]. Типичная тропоколлагеновая структура включает приблизительно 21 % пролина, 35 % глицина, 11 % аланина и гидроксипролина, при этом для коллагена характерно отсутствие в его составе аминокислоты цис-

теина [39, 41, 42]. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что коллаген, экстрагированный из *A. aurita*, богат глицином и пролином (массовая доля 24 %). Коллаген, выделенный из *A. aurita*, не содержит цистеина (рис. 3а, табл. 1). Эмпирические данные по аминокислотному составу коллагена, выделенного из кожи *S. lucio-perca*, также подтверждают отсутствие цистеина, при этом массовая доля глицина и пролина достигает 10 % (рисунок 3б, табл. 1). Такой состав обеспечивает формирование тройной спиральной структуры, которая обуславливает высокую механическую стабильность и прочность на разрыв, а также структурную сложность молекулы [43]. Как отмечается в работе M. Zhu *et al.*, наличие пролина и гидроксипролина является основой для образования прочной тройной спирали коллагена [44]. E. Cadar *et al.*, указывают на то, что гидроксипролин, находящийся в Y-положении, значительно повышает стабильность спиральной конформации коллагена [41]. Более того, тройная спиральная структура способствует образованию межмолекулярных связей, включая водородные связи и силы Ван-дер-Ваальса, что обеспечивает высокую стабильность молекулы [45]. Благодаря свойствам – механической прочности, биосовместимости, контролируемой биоразлагаемости и структурной гибкости, коллаген стал фундаментальным компонентом в разработке биоматериалов и может рассматриваться в качестве перспективного сырья для создания каркасов в технологии культивированного мяса [43].

Важно отметить, что гидролизат коллагена, представленный трипептидами, демонстрирует высокую биодоступность и эффективно усваивается в ЖКТ человека [45, 46], что позволяет рассматривать его не только в качестве структурного каркаса для биопроизводства культивированного мяса, но и как дополнительный источник аминокислот. Согласно последним данным *in vitro*, протеолитическое расщепление коллагена приводит к образованию не только свободных аминокислот, но и биологически активных олигопептидов, характеризующихся пониженной поверхностной гидрофобностью и выраженными антиоксидантными свойствами [47]. Исследование аминокислотного состава коллагена, извлеченного из кожи *S. lucio-perca* и биомассы *A. aurita*, показало различия в профиле аминокислот, включая несколько незаменимых: валин, изолейцин, лейцин, метионин, фенилаланин, треонин и гистидин (табл. 1). Таким образом, потребление культивированного мяса, произведенного с использованием таких каркасов, может способствовать дополнительному обогащению рациона человека незаменимыми аминокислотами. Полученные результаты подтверждают обоснованность выбора данной макромолекулы в качестве основы для трехмерных каркасов (скаффолдов).

Скаффолды, выполняющие функцию искусственного внеклеточного матрикса, обеспечивают поддержку клеточной адгезии и пролиферации. Клетки, культивируемые на таких структурах *in vitro*, впоследствии

могут быть использованы для безопасного употребления в пищу. В то время как Y. Xu *et al.* [6] предлагают использовать желатин в качестве заменителя белков внеклеточного матрикса, в настоящей работе в качестве перспективного материала для скаффолдов предлагается морской коллаген, выделенный из *A. aurita* и кожи *S. lucioperca*. Можно предположить, что каркасы на его основе будут обладать удовлетворительными физико-биологическими свойствами, обеспечивающими необходимую механическую поддержку. Для верификации гипотезы о применимости морского коллагена в качестве скаффолда была проведена оценка его безопасности и биосовместимости с использованием МТТ-теста на клеточной линии первичных коровьих фибробластов. Данный тест, широко применяемый для предварительной оценки цитотоксичности биоматериалов *in vitro*, эффективно определяет повреждение митохондрий, что коррелирует с показателем клеточной жизнеспособности [48, 49]. Результаты, полученные через 24 ч после инкубации (табл. 2), показали, что жизнеспособность фибробластов при контакте с коллагеном из *A. aurita* составила $80,67 \pm 0,58$ %; из кожи *S. lucioperca* – $79,85 \pm 0,96$ %. Эти данные свидетельствуют о высокой биосовместимости исследуемых образцов и отсутствии цитотоксического эффекта. Аналогичные выводы были сделаны S.W. Vedakumari *et al.*, которые, используя МТТ-тест на фибробластах NIH3T3, подтвердили, что коллагеновый скаффолд сохраняет клеточную жизнеспособность, что указывает на его биосовместимость и нетоксичность [48]. J. Nadi *et al.* отмечают, что растущие клетки способны адгезировать к каркасным материалам, таким как коллагеноподобные гели, которые служат поддерживающей сетью для развития ткани [50]. Результаты, полученные K. Ahmad *et al.*, также подтверждают высокую биосовместимость и низкую антигенность коллагена и возможность его применения для улучшения клеточной адгезии и в качестве носителя для клеточных культур [37].

В связи с этим заключительный этап исследования был посвящен оценке способности морского коллагена к гелеобразованию и его пригодности для 3D-биопечати с целью создания скаффолдов. Представленные данные (рис. 4) демонстрируют, что коллаген обладает способностью формировать гели, сохраняющие заданную форму и структуру. Таким образом, коллаген из биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* может быть рекомендован как сырье для создания каркасов. Для точного воспроизведения внеклеточного матрикса критически важна трехмерная (3D) архитектура скаффолда, содержащая взаимосвязанную поровую сеть в вязкоупругой матрице. Такой каркас регулирует клеточное поведение, обеспечивает структурную поддержку и опосредует межклеточную коммуникацию [51, 52]. Результаты биопечати (рис. 5) показали, что гели на основе морского коллагена позволяют формировать решетчатую структуру. Однако было отмечено,

что после гелеобразования происходит изменение объема (усадка) и уменьшение толщины нитей, что необходимо учитывать при проектировании объектов заданных размеров, применяя соответствующие коэффициенты масштабирования.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что использование коллагеновых каркасов способствует получению культивированного мяса с правильно организованной волокнистой структурой, приближенной к натуральной [6]. Для анализа функциональных групп и вторичной структуры коллагена и продуктов на его основе применялась ИК-Фурье спектроскопия. Этот метод позволяет идентифицировать функциональные группы [29, 53, 54] и устанавливать корреляции между строением и свойствами молекулы [44, 55]. Спектры поглощения исследованных образцов (рис. 6) демонстрируют характерные для белков пики: амид А в области $3300\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, соответствующий валентным колебаниям N–H связей; амид I ($1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$), связанный с колебаниями карбонильных групп C=O, и амид II ($1510\text{--}1570\text{ см}^{-1}$). Наличие этих полос подтверждает коллагеновую природу исследуемых образцов. Пики в области около 1100 см^{-1} могут быть отнесены к колебаниям амина- или гидроксильных групп аминокислотных остатков [56]. Таким образом, ИК-спектроскопия подтвердила наличие основных функциональных групп, характерных для коллагена, и показала, что процесс гелеобразования не приводит к значительным изменениям в его молекулярной структуре. В результате настоящего исследования доказано, что морской коллаген из *A. aurita* и кожи *S. lucioperca* может использоваться в качестве биоматериала для создания скаффолдов, необходимых для производства культивированного мяса. Каркасы на основе биосовместимого коллагена безопасны и могут употребляться в пищу как в приготовленном, так и в сыром виде. Данный материал соответствует ключевым требованиям, предъявляемым к скаффолдам: безопасность, экономическая эффективность и доступность для крупномасштабного производства [38]. Ограничением полученных результатов является отсутствие данных о механических свойствах разработанных гидрогелей. Как отмечено в работе [51], эффективные скаффолды должны обладать соответствующими материальными и механическими характеристиками для поддержки искусственно созданной ткани

Выводы

Проведены комплексные исследования, характеризующие физико-химические свойства и биотехнологический потенциал коллагена, выделенного из биомассы *Aurelia aurita* и кожи *Sander lucioperca*. Электрофоретическим методом установлено, что изучаемый коллаген состоит из двух полипептидных цепей (α -цепей и β -цепей) с молекулярной массой 240 кДа (для коллагена *A. aurita*) и 220 кДа (для двух цепей коллагена, выделенного из кожи *S. lucioperca*). С помощью

измерения дзета-потенциала растворов коллагена показано, что полученный из морских животных коллаген имеет оптимальное значение изоэлектрической точки, которое необходимо для протекания процессов роста и развития культуры клеток, в т. ч. стволовых и мышечных стволовых клеток (изоэлектрическая точка коллагена *A. aurita* составила 5,20; для коллагена *S. lucioперca* – 4,90).

Доказано, что жесткость коллагена и его структурные (каркасные) функции обусловлены уникальным аминокислотным составом молекулы. Методом капиллярного электрофореза установлено, что изучаемый коллаген содержит семь незаменимых аминокислот (валин, изолейцин, лейцин, метионин, фенилаланин, треонин, гистидин) и поэтому может рассматриваться не только в качестве каркаса для производства культивируемого мяса, но и как дополнительный источник аминокислот в организме человека.

С помощью МТТ-теста продемонстрировано, что исследуемые коллагены обладают высокой биосовместимостью и характеризуются отсутствием цитотоксического эффекта. Оценка гелеобразования позволила выявить способность коллагена сохранять форму и структуру в виде решетки.

Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что коллаген биомассы *A. aurita* и кожи *S. lucioперca* может быть использован для создания гелей как биокаркасов, необходимых для производства культивируемого мяса. Стоит отметить, что для использования коллагена в качестве биоматериала для создания каркасов необходимо изучить его механические свойства. В литературе показано,

что успешные каркасы должны обладать соответствующими материальными и механическими свойствами для поддержки искусственно созданной ткани.

Критерии авторства

Ю. В. Куликова – 35 %, Д. И. Спорышева – 15 %, М. А. Ташкинов – 10 %, С. Ю. Носкова – 10 %, О. О. Бабич – 30 %.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2023-601 (доб. регистрационный № 13.2251.21.0219).

Contribution

Yu.V. Kulikova – 35%, D.I. Sporysheva – 15%, M.A. Tashinov – 10%, S.Yu. Noskova – 10%, O.O. Babich – 30%.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Список литературы / References

1. Gu H, Kong Y, Huang D, Wang Y, Raghavan V, *et al.* Scaling cultured meat: Challenges and solutions for affordable mass production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(4):e70221. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70221>
2. Gu Y, Li X, Chan ECY. Risk assessment of cultured meat. *Trends in Food Science & Technology*. 2023;138:491–499. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.037>
3. Berners-Lee M, Kennelly C, Watson R, Hewitt CN. Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2018;6(1):52. <https://doi.org/10.1525/elementa.310>
4. Park SM, Ryoo JH, Kwon HC, Han SG. Scaffold biomaterials in the development of cultured meat: A review. *Food Science of Animal Resources*. 2025;45(3):688–710. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e13>
5. Post MJ, Levenberg S, Kaplan DL, Genovese N, Fu J, *et al.* Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food*. 2020;1(7):403–415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
6. Xu Y, Liu D, Zhang X, Yang J, Cao J, *et al.* Functionalized gelatin-based materials: Advancing bio-fabrication applications for cell-cultured meat. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(6):70306. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70306>
7. Jung S, Choi B, Lee M, Park S, Choi W, *et al.* Bio-orchestration of cellular organization and human-preferred sensory texture in cultured meat. *ACS nano*. 2025;19(2):2809–2821. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15622>
8. Bomkamp C, Skaalure SC, Fernando GF, Ben-Arye T, Swartz EW, *et al.* Scaffolding biomaterials for 3D cultivated meat: prospects and challenges. *Advanced Science*. 2022;9(3):2102908. <https://doi.org/10.1002/advs.202102908>
9. Imran M, Liyan Z. Production of plant-based meat: functionality, limitations and future prospects. *Food Research and Technology*. 2023;249(9):2189–2213. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04287-w>

10. Kulikova Yu, Sukhikh S, Zhikhreva A, Noskova S, Babich O. Comparative analysis of collagen from different sources for wound and burn management. BMT. 2025;00013. <https://doi.org/10.12336/bmt.25.00013>
11. Socrates R, Nagarajan S, Bechelany M, Kalkura N. Collagen based biomaterials for tissue engineering applications: A review. Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. 2019;3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21614-6_1
12. Amirrah IN, Lokanathan Y, Zulkiflee I, Wee MMR, Motta A, et al. A comprehensive review on collagen type I development of biomaterials for tissue engineering: From biosynthesis to bioscaffold. Biomedicines. 2022;10(9):2307. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10092307>
13. Cen L, Liu W, Cui L, Zhang W, Cao Y. Collagen tissue engineering: Development of novel biomaterials and applications. Pediatric research. 2008;63(5):492–496. <https://doi.org/10.1203/pdr.0b013e31816c5bc3>
14. Kozik W, Polak-Bielawska D, Kutaj A, Savitskaya T. Collagen as a bioactive ingredient in nutricosmetology – A review. Quality in Sport. 2025;46:66618. <https://doi.org/10.12775/QS.2025.46.66618>
15. Ferreira AM, Gentile P, Chiono V, Ciardelli G. Collagen for bone tissue regeneration. Acta Biomaterialia. 2012;8(9):3191–3200. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.014>
16. Bronzino J. The biomedical engineering handbook. Boca Raton: CRC Press; 2000. 3189 p.
17. Ezati P, Khan A, Bhattacharya T, Zaitoon A, Zhang W, et al. Recent Advances in collagen and collagen-based packaging materials: A review. ACS Food Science & Technology. 2025;5(5):1767–1784. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00938>
18. Barzideh Z, Latiff AA, Gan CY, Benjakul S, Karim AA. Isolation and characterisation of collagen from the Ribbon jellyfish (*Chrysaora* sp.). International Journal of Food Science and Technology. 2014;49(6):1490–1499. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12464>
19. Nashchekina YA, Sirotkina MY, Darvish DM, Barsuk IA, Moskalyuk OA, et al. The effect of carbodiimide on the structural, mechanical and biological properties of collagen films. Cell and Tissue Biology. 2021;15(6):586–593. <https://doi.org/10.1134/S1990519X21060079>
20. Rangel-Garcia AM, Alvarez-Perez MA, Rivera-Torres F, Piña-Barba MC. Study of the effect of two different chemical cross-linking agents (EDC/NHS and genipin) on the physical, chemical, and mechanical properties of collagen, polycaprolactone, and chitosan scaffolds. Biomedical Materials & Devices. 2025;3:1491–1500. <https://doi.org/10.1134/S1990519X21060079>
21. Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967. 232 с. [Kargin V. A., Slonimsky G. L. Brief essays on the physical chemistry of polymers. Moscow: Khimia; 1967. 232 p. (In Russ.)]
22. Ahmad M, Benjakul S, Nalinanon S. Compositional and physicochemical characteristics of acid solubilized collagen extracted from the skin of unicorn leatherjacket (*Aluterus monoceros*). Food Hydrocolloids. 2010;24:588–594. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.03.001>
23. Barzideh Z, Latiff AA, Gan CY, Benjakul S, Karim AA. Isolation and characterisation of collagen from the Ribbon jellyfish (*Chrysaora* sp.). International Journal of Food Science and Technology. 2014;49(6):1490–1499. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12464>
24. Li P, Wu G. Roles of dietary glycine, proline, and hydroxyproline in collagen synthesis and animal growth. Amino acids. 2018;50(1):29–38. <https://doi.org/10.1007/s00726-017-2490-6>
25. Weber K, Osborn M. The reliability of molecular weight determinations by dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis. Journal of Biological Chemistry. 1969;244(16):4406–4412. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)94333-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)94333-4)
26. Felician FF, Yu R-H, Li M-Z, Li C-J, Chen H-Q, et al. The wound healing potential of collagen peptides derived from the jellyfish *Rhopilema esculentum*. Chinese Journal of Traumatology. 2019;22(1):12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2018.10.004>
27. Kittiphattanabawon P, Benjakul S, Visessanguan W, Shahidi F. Isolation and characterization of collagen from the cartilages of brownbanded bamboo shark (*Chiloscyllium punctatum*) and blacktip shark (*Carcharhinus limbatus*). LWT. 2010;43(5):792–800. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.01.006>
28. Srinivasan S, Durairaj B. Collagen isolation and characterization from *Sardinella longiceps*. Journal of Advanced Veterinary and Animal Research. 2021;8(4):679–686. <https://doi.org/10.5455/javar.2021.h560>
29. Abinaya M, Gayathri M. Biodegradable collagen from *Scomberomorus lineolatus* skin for wound healing dressings and its application on antibiofilm properties. Journal of cellular biochemistry. 2019;120(9):15572–15584. <https://doi.org/10.1002/jcb.28824>
30. Righetti PG. Determination of the isoelectric point of proteins by capillary isoelectric focusing. Journal of chromatography A. 2004;1037(1–2):491–499. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2003.11.025>
31. Kantardjieff KA, Rupp B. Protein isoelectric point as a predictor for increased crystallization screening efficiency. Bioinformatics. 2004;20(14):2162–2168. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bth066>
32. Khong NMH, Yusoff FMd, Jamilah B, Basri M, Maznah I, et al. Improved collagen extraction from jellyfish (*Acromitus hardenbergi*) with increased physical-induced solubilization processes. Food Chemistry. 2018;251:41–50. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.083>

33. Balikci E, Baran ET, Tahmasebifar A, Yilmaz B. Characterization of collagen from jellyfish *Aurelia aurita* and investigation of biomaterials potentials. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2024;196(6):1–22. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04848-5>
34. Vlierberghe SV, Graulus G-J, Samal KS, Nieuwenhove IV, Dubruel P. Porous hydrogel biomedical foam scaffolds for tissue repair. In *Biomedical Foams for Tissue Engineering Applications*. 2014;335–390. <https://doi.org/10.1533/9780857097033.2.335>
35. Perez-Puyana V, Jiménez-Rosado M, Romero A, Guerrero A. Fabrication and characterization of hydrogels based on gelatinised collagen with potential application in tissue engineering. *Polymers*. 2020;12(5):1146. <https://doi.org/10.3390/polym12051146>
36. Kim M, Jung HY, Jo C. Fundamental study on structural formation, amino acids and nucleotide-related compounds of cultivated meat from 3D-cultured pig muscle stem cells. *Food Science and Biotechnology*. 2024;34(2):457. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01793-9>
37. Ahmad K, Lim JH, Lee EJ, Chun HJ, Ali S, *et al.* Extracellular matrix and the production of cultured meat. *Foods*. 2021;10(12):3116. <https://doi.org/10.3390/foods10123116>
38. Post MJ, Levenberg S, Kaplan DL, Genovese N, Fu J, *et al.* Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature food*. 2020;1(7):403–415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
39. Gauza-Włodarczyk M, Kubisz L, Włodarczyk D. Amino acid composition in determination of collagen origin and assessment of physical factors effects. *International journal of biological macromolecules*. 2017;104:987–991. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.013>
40. Moreno HM, Montero MP, Gómez-Guillén MC, Fernández-Martín F, Mørkøre T, *et al.* Collagen characteristics of farmed *Atlantic salmon* with firm and soft fillet texture. *Food chemistry*. 2012;134(2):678–685. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.160>
41. Cadar E, Pesterau AM, Prasacu I, Ionescu AM, Pascale C, *et al.* Marine antioxidants from marine collagen and collagen peptides with nutraceuticals applications: A Review. *Antioxidants*. 2024;13(8):919. <https://doi.org/10.3390/antiox13080919>
42. Ryu B, Shin KH, Kim SK. Muscle protein hydrolysates and amino acid composition in fish. *Marine Drugs*. 2021;19:377–389. <https://doi.org/10.3390/md19070377>
43. Emam AN. Collagen and collagen-derived materials: synthesis, structure, classification, fundamental properties and biomedical applications. *Discover Applied Sciences*. 2025;7(10):1114. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07780-x>
44. Zhu M, Li S, Chen L, Cheng C, Yu J, *et al.* Insights into microstructure, physicochemical characteristics and functional properties of collagen extracted from various livestock skins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2025;105(14):7779–7787. <https://doi.org/10.1002/jsfa.70023>
45. Wang J, Wang H, Shi X, Xu L. Research progress on extraction methods, bioactivity, and food industry applications of collagen from livestock and poultry slaughter by-products: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2026;1–14. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03965-5>
46. López-Yoldi M, Riezu-Boj JI, Abete I, Ibero-Baraibar I, Aranaz P, *et al.* I. Anti-obesity effects of a collagen with low digestibility and high swelling capacity: A human randomized control trial. *Nutrients*. 2024;16(20):3550. <https://doi.org/10.3390/nu16203550>
47. Wang M, Liu Y, Pallarés N, El Marsni Z, Kousoulaki K, *et al.* Determination of collagen types and mineral contents in fish skin and collagen-containing skin-derived protein hydrolysates before and after *in vitro* simulated digestion. *Food & Function*. 2025;16(3):1032–1040. <https://doi.org/10.1039/D4FO03137G>
48. Vedakumari SW, Prabakaran L, Pravin YR. Preparation and characterization of marine collagen scaffolds for biomedical applications. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*. 2026;1–8. <https://doi.org/10.1007/s40883-025-00554-2>
49. Venkatesan P, Puvvada N, Dash R, Kumar BNP, Sarkar D, *et al.* The potential of celecoxib-loaded hydroxyapatite-chitosan nanocomposite for the treatment of colon cancer. *Biomaterials*. 2011;32:3794–806. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.01.027>
50. Hadi J, Brightwell G. Safety of alternative proteins: technological, environmental and regulatory aspects of cultured meat, plant-based meat, insect protein and single-cell protein. *Foods*. 2021;10:1226. <https://doi.org/10.3390/foods10061226>
51. Tahir I, Floreani R. Dual-crosslinked alginate-based hydrogels with tunable mechanical properties for cultured meat. *Foods*. 2022;11(18):2829. <https://doi.org/10.3390/foods11182829>
52. Волкова Н. А., Юрченко К. А., Дегирменджи Э. Т., Саенко Ю. С., Фомочкина И. И. и др. Биопринтинг с использованием экструзионных методик и оптимальные биоматериалы для D-биопечати компонентов кожи. *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины*. 2025. Т. 14. № 4. С. 84–95. [Volkova NA, Yurchenko KA, Degirmendzhi ET, Saenko YuS, Fomochkina II, *et al.* Bioprinting using extrusion techniques and optimal biomaterials for D-bioprinting of skin components. *Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2025;14(4):84–95. (In Russ.)]
53. Норбоева М. А., Джалилов А. Т., Соттикулов Э. С., Норбоев А. А. Получение формиата натрия на основе щелочного окисления формальдегида и исследование его термических и спектральных свойств. *Химия и биология*. 2026. № 3. С. 33–39. [Norboeva MA, Dzhaliilov AT, Sottikulov ES, Norboev AA. Sodium formate production by alkaline oxidation of formaldehyde: Thermal and spectral properties. *Chemistry and Biology*. 2026;3:33–39. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32743/UniChem.2026.139.1.21557>

54. Макарова Е. Л., Кожокина О. М. Исследование механизма взаимодействия глюкоамилазы с коллагеном методом ИК-спектроскопии. Прикладные информационные аспекты медицины. 2025. Т. 28. № 3. С. 85–94. [Makarova EL, Kozhokina OM. Interaction of glucoamylase with collagen by IR spectroscopy. Applied Information Aspects of Medicine. 2025;28(3):85–94. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18499/2070-9277-2025-28-3-85-94>

55. Тимченко П. Е., Фролов О. О., Рябов Н. А., Тимченко Е. В., Волова Л. Т. и др. Алгоритм идентификации разных форм аллогенного коллагенсодержащего материала как основы для биочернил с помощью оптических методов анализа. Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 4. С. 353–357. [Timchenko PE, Frolov OO, Ryabov NA, Timchenko EV, Volova LT, *et al.* An algorithm for identifying allogeneic collagen-containing materials for bioink: Optical analysis methods. Optics and Spectroscopy. 2024;132(4):353–357. (In Russ.)]

56. Iqbal B, Muhammad N, Jamal A, Ahmad P, Khan ZUH, *et al.* An application of ionic liquid for preparation of homogeneous collagen and alginate hydrogels for skin dressing. Journal of Molecular Liquids. 2017;243:720–725. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.08.101>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Куликова Юлия Владимировна / Yuliya V. Kulikova ORCID 0000-0002-0896-4571; eLIBRARY SPIN 6907-7280
Спорышева Дарья Ивановна / Daria I. Sporysheva ORCID 0009-0009-0166-2384; eLIBRARY SPIN 2151-2367
Ташкинов Михаил Анатольевич / Mikhail A. Tashkinov ORCID 0000-0003-4660-0020; eLIBRARY SPIN 7694-2129
Носкова Светлана Юрьевна / Svetlana Yu. Noskova ORCID 0000-0003-1198-1951; eLIBRARY SPIN 1884-7403
Бабич Ольга Олеговна / Olga O. Babich ORCID 0000-0002-4921-8997; eLIBRARY SPIN 2744-9496