

# ПАТОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИОЛОГИЯ

---

## PHYSIOPATHOLOGY

УДК 617-089.844:615.361:611.018  
doi: 10.21685/2072-3032-2025-3-14

### Разработки биомедицинских технологий путем рационального использования биоресурсов Арктики

Н. А. Шутский<sup>1</sup>, С. Л. Кашутин<sup>2</sup>, Н. С. Феленко<sup>3</sup>,  
Е. Д. Кубасова<sup>4</sup>, Д. В. Мизгирев<sup>5</sup>, О. В. Калмин<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Северный государственный медицинский университет, Архангельск, Россия

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия

<sup>6</sup>Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>nikitashutskijj@rambler.ru, <sup>2</sup>sergeycash@yandex.ru, <sup>3</sup>nikolaifelenko@yandex.ru,

<sup>4</sup>lapkino2001@mail.ru, <sup>5</sup>denimsur@rambler.ru, <sup>6</sup>ovkalmin@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Перед современным мясным производством остро стоит проблема рационального использования побочных продуктов и отходов, объем которых составляет до 40 %. В этих условиях крайне необходимо развивать комплексную переработку побочного сырья для производства пищевых продуктов, медицинских препаратов, кормовых и технических товаров, что позволит повысить экономическую эффективность отрасли и обеспечить продовольственную и фармацевтическую безопасность страны. В связи с колоссальной потребностью военно-полевой и гражданской медицины в новых материалах побочные непищевые продукты мясного производства могут стать перспективным источником биополимеров, выделение которых позволит создать новые композиции с заданными свойствами для различных прикладных направлений. Цель исследования – разработка новых подходов рационального использования биоресурсов Арктического региона для получения материалов на основе полимерных белков соединительной ткани северного оленя. *Материалы и методы.* В качестве исходного сырья были использованы побочные продукты разведения северных оленей – шкура и аорта. Предложены новые технологии получения биоматериала на основе коллагена и биоматериала на основе эластина. Анализ целевых продуктов проводили гистологическим методом со специфичными красителями к компонентам соединительной ткани и посредством сканирующей электронной микроскопии. *Результаты.* Получены биоматериалы на основе коллагена и эластина с сохраненными природными структурами. Гистологическое исследование и сканирующая электронная микроскопия полученных материалов показали отсутствие основных антигенных компонентов – клеточных элементов и межтканевого вещества. *Вывод.* Новые разработки по полной переработке побочных продуктов мясного производства с целью получения материалов на основе белков животного происхождения могут внести большой вклад не только в экономический сектор, но и оказать существенное влияние на развитие медицины. Предложенные технологии позволяют по-

---

© Шутский Н. А., Кашутин С. Л., Феленко Н. С., Кубасова Е. Д., Мизгирев Д. В., Калмин О. В., 2025.  
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

лучить биоматериалы на основе коллагена и эластина со сниженными антигенными свойствами, применение которых нацелено на ускорение репаративных процессов.

**Ключевые слова:** биоресурсы, Арктический регион, коллаген, эластин, шкура и аорта северного оленя

**Финансирование:** научное исследование проведено в рамках государственного задания № 124022800143-5.

**Для цитирования:** Шутский Н. А., Кашутин С. Л., Феленко Н. С., Кубасова Е. Д., Мизгирев Д. В., Калмин О. В. Разработки биомедицинских технологий путем рационального использования биоресурсов Арктики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2025. № 3. С. 156–169. doi: 10.21685/2072-3032-2025-3-14

## Development of biomedical technologies through the rational use of arctic bioresources

N.A. Shutskiy<sup>1</sup>, S.L. Kashutin<sup>2</sup>, N.S. Felenko<sup>3</sup>,  
E.D. Kubasova<sup>4</sup>, D.V. Mizgirev<sup>5</sup>, O.V. Kalmin<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russia

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

<sup>6</sup>Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>nikitashutskijj@rambler.ru, <sup>2</sup>sergeycash@yandex.ru, <sup>3</sup>nikolaifelenko@yandex.ru,

<sup>4</sup>lapkino2001@mail.ru, <sup>5</sup>denimsur@rambler.ru, <sup>6</sup>ovkalmin@gmail.com

**Abstract. Background.** Modern meat production is faced with an acute problem of rational use of by-products and waste, the volume of which is up to 40 %. In these conditions, it is extremely necessary to develop complex processing of by-products for the production of food, medicines, feed and technical goods, which will increase the economic efficiency of the industry and ensure the food and pharmaceutical security of the country. Based on the enormous need for new materials in military field and civilian medicine, non-food by-products of meat production are promising sources of biopolymers, the isolation of which will allow the creation of new compositions with desired properties for various applications. The purpose of the study is to develop new approaches to the rational use of biological resources of the Arctic region for the production of materials based on polymer proteins of the connective tissue of reindeer. **Material and methods.** Development of new approaches to the rational use of bioresources of the Arctic region to obtain materials based on polymeric proteins of reindeer connective tissue. **Results.** Biomaterials based on collagen and elastin with preserved natural structures were obtained. Histological examination and scanning electron microscopy of the obtained materials showed the absence of any cellular elements and interstitial substance. **Conclusion.** New developments in the complete processing of by-products of meat production in order to obtain materials based on animal proteins can make a great contribution not only to the economic sector, but also have a significant impact on the development of medicine. The technologies proposed in this work make it possible to obtain biomaterials based on collagen and elastin with reduced antigenic properties, the use of which is aimed at accelerating reparative processes.

**Keywords:** bioresources, Arctic region, collagen, elastin, reindeer skin and aorta

**Financing:** the work was performed within a state assignment No. 124022800143-5.

**For citation:** Shutskiy N.A., Kashutin S.L., Felenko N.S., Kubasova E.D., Mizgirev D.V., Kalmin O.V. Development of biomedical technologies through the rational use of arctic bioresources. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Medical sciences*. 2025;(3):156–169. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3032-2025-3-14

## Введение

В современном мясном производстве многих регионов, включая Урал, Дальний Восток и Арктическую зону, остро стоит проблема рационального использования побочных продуктов и отходов, объем которых составляет до 40 % от общего объема производства [1]. К ним относят шкуры, кости, кровь, рога, внутренние органы, сосуды и др. [2, 3]. Несмотря на высокую ценность этих ресурсов как вторичного источника животного белка, их эффективное использование остается на низком уровне [4]. В России фактически собирается не более 30 % от потенциально возможного объема побочного сырья [5].

Особенно тревожной является ситуация с эндокринно-ферментным сырьем: показатели сбора этого материала критически низкие. Например, сбор поджелудочной железы коров составляет всего 1,8 % от нормативного значения, а задней доли гипофиза – менее 1 % [6]. В результате страна вынуждена импортировать важные фармацевтические компоненты, такие как инсулин, который сейчас производится исключительно из зарубежного сырья.

В этих условиях крайне необходимо развивать комплексную переработку побочного сырья для производства пищевых продуктов, медицинских препаратов, кормовых и технических товаров, что позволит не только повысить экономическую эффективность отрасли, но и обеспечить продовольственную и фармацевтическую независимость страны.

Основными направлениями утилизации побочных продуктов и отходов долгое время считались компостирование, термические методы и переработка на корм [7]. Впоследствии во многих странах были разработаны специальные программы государственного уровня, нацеленные на снижение негативного влияния продуктов разложения (метан, углекислый газ и др.) на окружающую среду [8].

Позднее начали появляться производства, использующие побочные продукты скотоводства в промышленных целях. Так, например, шкуры начали использовать на кожевенных, обувных и меховых предприятиях [9, 10]. При этом главным критерием является сохранение целостности шкуры.

Другим примером может послужить технология получения биогаза и альтернативных источников энергии в виде брикетов из биоугля при пиролизе. М. I. Said в своем обзоре [3] выделил ряд преимуществ получаемых брикетов:

- безопасность для здоровья человека, поскольку не содержат дыма, сажи, неприятного запаха, серы и азота;
- сниженная стоимость производства, высокая тепловая энергия и снижение загрязнения окружающей среды по сравнению с керосином или древесным углем.

С биомедицинской точки зрения, а также на основании колоссальной потребности в новых материалах военно-полевой и гражданской медицины, побочные непищевые продукты мясного производства (шкура, кости, сосуды, внутренние органы) являются потенциальными источниками биополимеров [11–14], выделение которых позволит создать новые материалы с заданными свойствами для различных отраслей, включая регенеративную медицину.

Цель настоящего исследования – разработка новых подходов рационального использования биоресурсов Арктического региона для получения материалов на основе полимерных белков соединительной ткани северного оленя.

### Материалы и методы

В качестве арктических биоресурсов в работе использовали возобновляемые побочные продукты разведения северных оленей (на базе СПК КО-ОПХОЗ «ЕРВ», п. Красное, Ненецкий автономный округ) – шкуры (коллагенсодержащий источник) и аорты (эластинсодержащий источник).

#### *Технология получения биоматериала на основе коллагена*

*Этап первый.* Предварительную очистку от поверхностного слоя жира, мышц и части дермы пресно-сухой шкуры северного оленя массой 2 кг проводили путем мездрения тупым ножом. Обезволашивание (удаление волосяного покрова со шкуры) осуществляли заранее подготовленной смесью (табл. 1), которую равномерно наносили с бахтармянной стороны намазным способом. Покрытую смесью растворов шкуру выдерживали в течение 40 мин при комнатной температуре, после чего удаляли волосяной покров и промывали водой.

Таблица 1  
Состав смеси для обезволашивания шкуры северного оленя

Компонент	Концентрация раствора (суспензии), %	Содержание, относительно массы шкуры, %
Гидроксид калия (KOH)	9	2,0
Сульфид натрия (Na <sub>2</sub> S)	9	1,0
Гидроксида кальция (Ca(OH) <sub>2</sub> )	9	1,6

*Этап второй.* Пикелевание шкуры проводили путем полного погружения обезволащенной шкуры и выдерживания в течение 48 ч в уксусно-солевом растворе, состоящем из 3 % раствора уксусной кислоты и хлорида натрия, масса которого равна массе шкуры.

*Этап третий.* По истечении времени шкуру промывали в течение 10 мин водой с растворенным в ней синтетическим моющим средством в соотношении 1 часть синтетического моющего средства на 200 частей воды с целью нейтрализации кислоты. В качестве синтетического моющего средства использовали стиральный порошок, содержащий в составе менее 5 % неионогенных поверхностно-активных веществ (ПАВ), 5–15 % анионных ПАВ, поликарбоксилаты и фосфонаты. Затем шкуру промывали водопроводной водой в течение 20 мин и высушивали в течение 3 суток на воздухе.

*Этап четвертый.* Обработку коллагенсодержащего сырья осуществляли в 20 % растворе лаурилсульфата натрия в шейкер-инкубаторе в течение 48 ч при температуре 37 °С и 150 об/мин. После этого материал промывали водой до тех пор, пока промывные воды не перестали мылиться и образовывать пену при взбалтывании.

*Этап пятый.* После глубокой заморозки при  $-80^{\circ}\text{C}$  полученный биоматериал подвергали лиофильному высушиванию с использованием сушилki FreeZone 2,0 (Labconco, США) при  $-40^{\circ}\text{C}$  и 0,040 мбар.

### ***Технология получения биоматериала на основе эластина***

*Этап первый.* Предварительную очистку аорты от крови и сгустков проводили путем скобления тупым ножом и промывки водопроводной водой. Далее аорту разрезали на фрагменты для увеличения площади реагирующей поверхности материала.

*Этап второй.* Полученные фрагменты материала обрабатывали 70 % этанолом в течение 4 ч в термостате при температуре  $37^{\circ}\text{C}$ .

*Этап третий.* Материал обрабатывали 96 % этанолом в течение 4 ч в термостате при температуре  $37^{\circ}\text{C}$ .

*Этап четвертый.* Удаление коллагеновых волокон из структуры аорты проводили ферментативно с помощью бактериальной коллагеназы II типа (расход – 0,05 мг фермента на 1 г субстрата, активность – 230 ед./мг, ПанЭко, Россия). Данный процесс осуществляли в термостатируемой ячейке шейкер-инкубатора в течение 2 ч при температуре  $37^{\circ}\text{C}$  и перемешивании со скоростью 250 об/мин. Поддержание pH среды осуществляли с использованием 1М фосфатного буферного раствора с  $\text{pH} = 6,86$ . Далее проводили промывку образца от низкомолекулярных продуктов ферментативного гидролиза (пептидов и свободных аминокислот) дистиллированной водой в центрифуге 5804R (Eppendorf, Германия) при 3400 об/мин в течение 5 мин при комнатной температуре. Цикл промывки повторяли 3 раза.

*Этап пятый.* Материал выдерживали в шейкер-инкубаторе в 20 % растворе лаурилсульфата натрия течение 20 ч при температуре  $37^{\circ}\text{C}$  и 250 об/мин с целью децеллюляризации, после чего осуществляли промывку в дистиллированной воде в центрифуге при 3400 об/мин в течение 5 мин. Цикл промывки повторяли 5 раз.

*Этап шестой.* После глубокой заморозки полученного биоматериала на основе эластина при  $-80^{\circ}\text{C}$  образцы подвергали лиофильному высушиванию с использованием сушилki FreeZone 2,0 (Labconco, США) при  $-40^{\circ}\text{C}$  и 0,040 мбар.

### ***Гистологическое исследование***

После совершенных этапов обработки проводили гистологическое исследование полученных биоматериалов. Образцы фиксировали в 10 % растворе формалина в течение 5 дней, после чего осуществляли стандартную гистологическую проводку, получали срезы толщиной 5 мкм и окрашивали рядом красителей (табл. 2).

### ***Сканирующая электронная микроскопия***

Фрагменты материала до и после обработки детергентом анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием Zeiss Sigma VP (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия) при ускоряющем напряжении 10 кВ, детектор SE2, апертура 7,5 мкм. Напылительную установку Q150T (Quorum Technologies Ltd, Великобритания) использовали для уве-

личения контрастности изображения образцов с помощью нанесения золотопалладиевого покрытия толщиной 5 нм в соотношении 80 : 20.

Таблица 2

## Применяемые методы окрашивания гистологических срезов

Метод	Красящие агенты	Результат окраски
Окраска гематоксилин-эозином	Эозин – спиртовой кислый краситель	Окраска эозинофильных (оксифильных) структур (цитоплазма и гранулы клеток, межклеточное вещество) красно-розовым цветом
Окраска гематоксилин-орсеином	Гематоксилин – основной краситель	Окраска базофильных клеточных структур (ядер и гранул) ярко-синим цветом
	Орсеин – нейтральный краситель с содержанием основных и кислых красящих компонентов	Окраска эластических волокон в темно-красный цвет
Окраска по методу Ван-Гизона	Кислый фуксин	Окраска коллагеновых волокон в ярко-красный цвет
	Пикриновая кислота	Окраска элементов соединительной ткани, не содержащих коллаген, приобретают желтый оттенок, в то время как клеточные ядра окрашиваются в черный цвет

## Результаты

**Биоматериал на основе коллагена.** Анализ гистологических срезов биоматериала на основе коллагена, полученного по предложенной технологии и окрашенного гематоксилин-эозином, показал отсутствие эпидермиса, клеточных элементов дермы и производных кожи – волосяных фолликулов, сальных желез, что наблюдалось в исходном сырье (рис. 1,*а,б*).

При окрашивании по методу Ван-Гизона, который является специфичным для изучения соединительной ткани, выявлено, что коллагеновые волокна сохраняются, а структура материала перфорированная вследствие вымывания межклеточного вещества (рис. 1,*в,г*). Полученные гистологические результаты подтверждены методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 1,*д,е*).

**Биоматериал на основе эластина.** Гистологическое исследование исходного сырья показало типичную структуру аорты. В структуре отчетливо наблюдаются ядра поверхностного однослойного плоского эпителия сосудов с подлежащей соединительнотканной зоной (рис. 2,*а,в*). Далее расположен средний слой, представленный преимущественно окончатными эластическими мембранами и базофильными ядрами клеток.

Анализ биоматериала на основе эластина, окрашенного с использованием гематоксилин-орсеина, подтверждал отсутствие клеточных элементов в полученном образце (рис. 2,*б,г*). Перфорированная структура гистологического препарата свидетельствовала об удалении межклеточного вещества фрагмента аорты. Подтверждала отсутствие клеточных элементов и ровная поверхность на фотоснимках, полученных методом сканирующей электрон-

ной микроскопии на обработанном биоматериале по сравнению с исходным образцом (рис. 2, *д, е*).

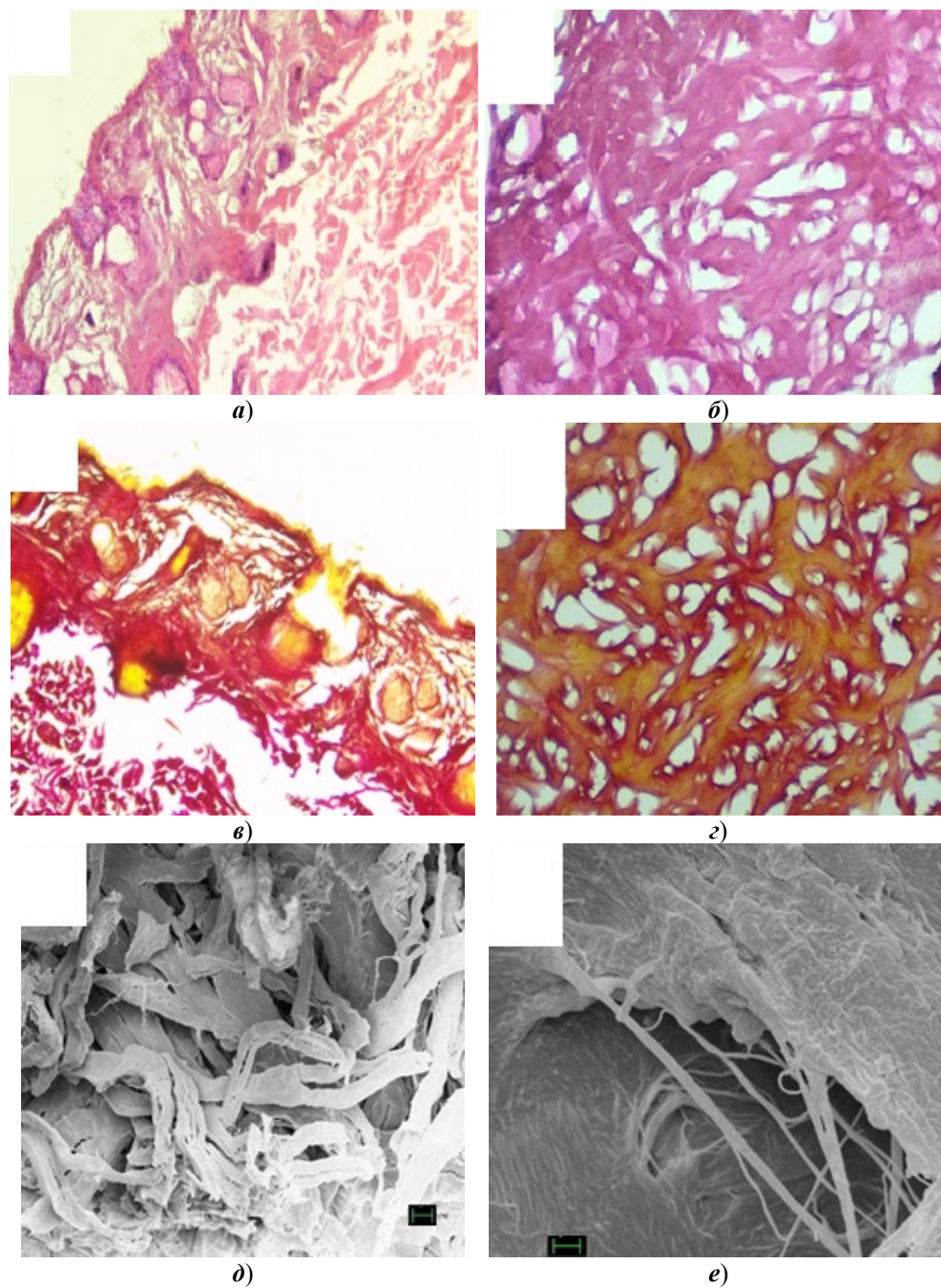


Рис. 1. Микрофотографии исходного коллагенсодержащего сырья и полученного биоматериала на основе коллагена: гистологическая окраска гематоксилин-эозином до (*а*) и после обработки (*б*) (об. 40, ок. 10); гистологическая окраска по методу Ван-Гизона до (*в*) и после обработки (*г*) (об. 40, ок. 10); сканирующая электронная микроскопия до (*д*) и после обработки (*е*), масштабная линейка – 20 мкм

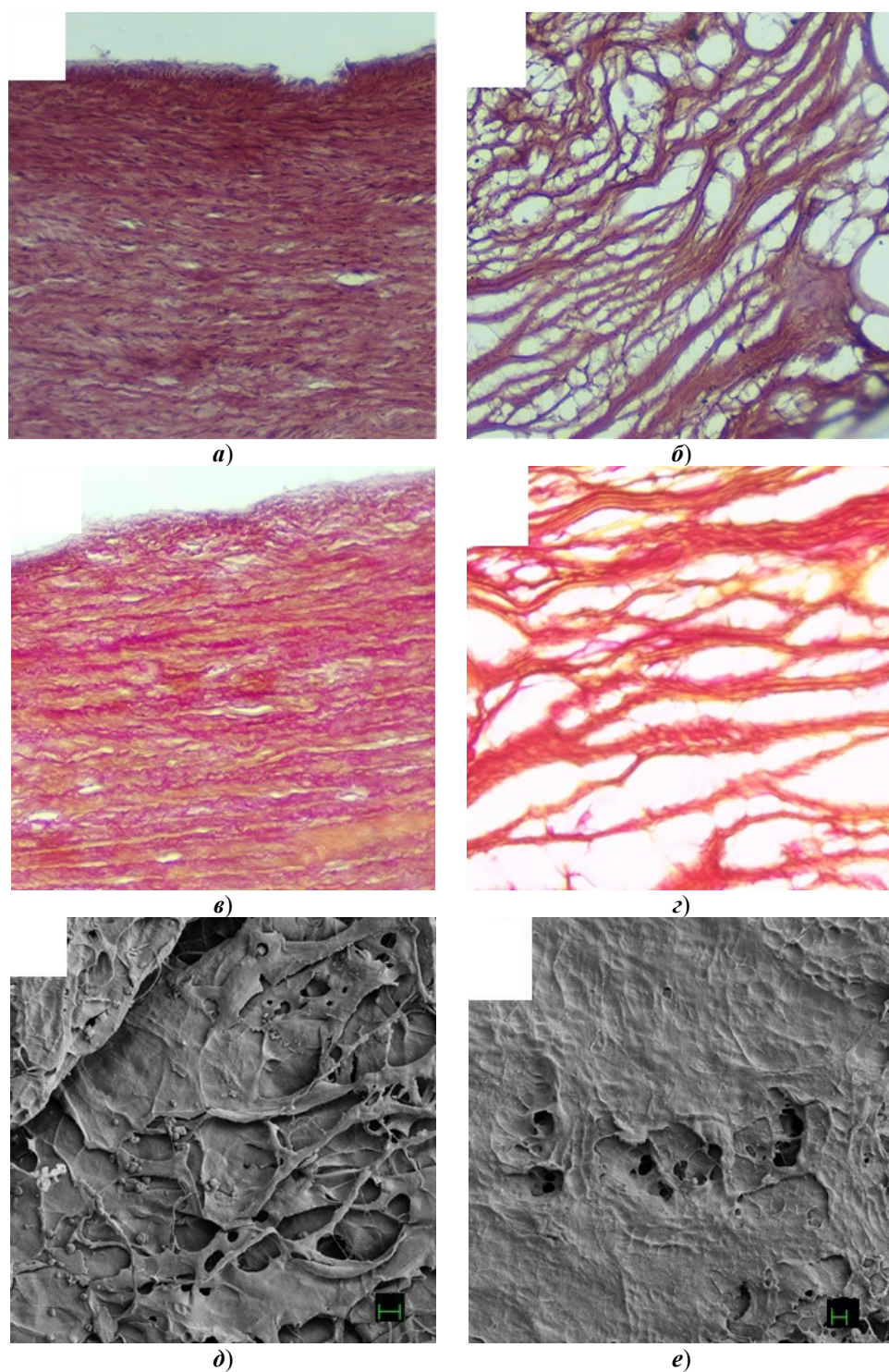


Рис. 2. Микрофотографии исходного эластинсодержащего сырья и полученного биоматериала на основе эластина: гистологическая окраска гематоксилин-орсеином до (а) и после обработки (б) (ув.  $\times 400$ ); гистологическая окраска по методу Ван-Гизона до (в) и после обработки (г) (ув.  $\times 400$ ); сканирующая электронная микроскопия до (д) и после обработки (е), масштабная линейка – 20 мкм

### Обсуждение

**Биоматериал на основе коллагена.** Шкура представляет собой сложную структуру, состоящую из волосистого покрова и трех основных слоев: эпидермиса, дермы и подкожной жировой клетчатки. Эпидермис является поверхностным слоем, состоящим в основном из клеток кератина, расположенных непосредственно под волосным покровом. Толщина эпидермиса составляет всего 1–5 % от толщины шкуры. Основным слоем шкуры является дерма, которая имеет волокнистую структуру и состоит из пучков коллагена, эластина и ретикулина, причем основную массу составляют коллагеновые волокна. Пучки переплетены между собой в разных направлениях, что обеспечивает дерме высокую прочность на разрыв. Шерсть преимущественно состоит из кератина – соединительного белка, который, в свою очередь, содержит большое количество цистина, определяющего химико-физические свойства молекулы. Наличие внутрицепочных и межцепочных поперечных дисульфидных связей обеспечивает кератину устойчивость к растворам щелочей, слабым кислотам, органическим растворителям и некоторым ферментам, переваривающим белки [15, 16].

Применение сульфида натрия в разработанной технологии основано на его способности разрушать дисульфидные связи цистина в щелочной среде, что приводит к растворению белка [17, 18]. В результате нарушаются контакты кератиноцитов, образованных по типу десмосом, а также контакты эпидермиса с дермой, образованные по типу полудесмосом. Утрачивается связь волосных фолликулов с эпидермисом и дермой, что способствует легкому удалению волос вместе с волосными фолликулами. Также при щелочной обработке коллагеновые волокна разрыхляются, а часть жиров омыляется и эмульгируется вместе с неколлагеновыми белками.

На втором этапе производили пикелевание полученного сырья 3 % раствором уксусной кислоты и хлоридом натрия с целью обезвоживания и разрыхления материала, а также создания слабокислой среды, препятствующей развитию и размножению гнилостных бактерий и последующей аммонификации.

Обработка детергентом полученного сырья направлена на достижение полной децеллюляризации и удаление межклеточного вещества. Известно, что клеточные структуры содержат белки, ДНК и РНК, которые наряду с полисахаридами межклеточного вещества обладают иммуногенными свойствами, а следовательно, способны вызывать острые и хронические реакции отторжения. Применение детергента основано на том факте, что клеточные и ядерные мембраны устроены по типу липидного бислоя [19, 20]. Лаурилсульфат натрия является сильным анионным поверхностно-активным веществом, образующим мицеллы при растворении в воде. Мицеллы связываются своими гидрофобными концами с гидрофобными участками на поверхности мембранных белков и вытесняют липиды, что приводит к разрушению плазмолеммы. Кроме того, благодаря детергенту из коллагеновых волокон удаляются углеводные компоненты, такие как гликозаминогликаны и протеогликаны.

Лиофильное высушивание, основанное на удалении кристаллов воды, минуя жидкую фазу, позволяет сохранить нативную структуру коллагеновых волокон и дополнительно снизить антигенные свойства продукта.

**Биоматериал на основе эластина.** Аорта является крупной артерией эластического типа, состоит из внутреннего, среднего и наружного слоев. Слой *intima* состоит из одного слоя эндотелиальных клеток, тонкой базальной мембраны и субэндотелиального слоя коллагеновых волокон. Самым прочным и эластичным является слой *media*, содержащий преимущественно эластические волокна, а также коллаген и гладкомышечные клетки. Слой *adventitia* состоит из рыхлой соединительной ткани с большим количеством коллагеновых волокон [21]. В настоящее время после забоя крупного рогатого скота аорты используют для получения кормов животного происхождения или применяют в качестве функционального мясного ингредиента благодаря наличию биологически активных веществ [22].

Механическая обработка заключалась в удалении внутреннего и наружного слоев аорты. Обработка спиртами на втором и третьем этапах проводилась с целью удаления влаги и денатурации части клеточных белков для разрыхления, что повышает эффективность последующей обработки препарата, а также для предотвращения размножения гнилостных бактерий в сырье и последующей аммонификации препарата.

Применение коллагеназы II типа до детергентной обработки направлено на ферментативный гидролиз коллагена во внеклеточном матриксе до растворимых форм.

Обработка детергентами полученного эластиносодержащего сырья и лиофильное высушивание осуществлялись для достижения децеллюляризации, элиминации межуточного вещества и сохранения эластических волокон в нативной форме по аналогии с технологией по получению биоматериала на основе коллагена.

### Заключение

Новые разработки по полной переработке побочных продуктов мясного производства с целью получения материалов на основе белков животного происхождения потенциально могут внести большой вклад не только в экономический сектор экономики, но и принести пользу в области медицины. Предложенные в настоящей работе технологии позволяют получить биоматериалы на основе коллагена и на основе эластина со сниженными антигенными свойствами. Возможность использования полученных биоматериалов не ограничивается непосредственным применением в качестве ксенотрансплантатов с целью ускорения репаративных процессов после повреждений органов и тканей. Кроме того, они могут являться основой для последующих разработок по получению многокомпонентных систем с заданными свойствами.

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Н. А. Шутский, С. Л. Кашутин – разработка идеи исследования, сбор и анализ данных, написание и утверждение текста статьи, Н. С. Феленко, Е. Д. Кубасова, – анализ данных и написание текста статьи; Д. В. Мизгирев – написание и утверждение текста статьи.

### Список литературы

1. Патшина М. В., Ворошилин Р. А., Осинцев А. М. Анализ мирового рынка биоматериалов с целью определения потенциальных возможностей сырья животного происхождения // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 2. С. 270–289. doi: 10.21603/2074-9414-2021-2-270-289
2. Sayeed R., Tiwari P. Wealth from meat industry by-products and waste: a review // *Sustainable Food Waste Management: Concepts and Innovations*. 2020. P. 191–208. doi: 10.1007/978-981-15-8967-6\_11
3. Said M. I. Characteristics of by-product and animal waste: A review // *Large Animal Review*. 2019. Vol. 25, № 6. P. 243–250.
4. Piercy E., Verstraete W., Ellis P. R. [et al.]. A sustainable waste-to-protein system to maximise waste resource utilisation for developing food-and feed-grade protein solutions // *Green Chemistry*. 2023. Vol. 25 (3). P. 808–832. doi: 10.1039/D2GC03095K
5. Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Повышение экологической безопасности путем разработки технологического регламента переработки и использования побочной продукции животноводства // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. № 1 (114). С. 141–154. doi: 10.24412/2713-2641-2023-1114-141-154
6. Семенова А. Технологии глубокой переработки как стратегия импортозамещения // *Мясная сфера*. 2016. № 1. С. 48–49.
7. Patshina M. V., Voroshilin R. A., Osintsev A. M. Global biomaterials market: potential opportunities for raw materials of animal origin // *Food processing: techniques and technology*. 2021. Vol. 51, № 2. P. 270–289. doi: 10.21603/2074-9414-2021-2-270-289
8. Петрунина И. В., Горбунова Н. А. Системные меры по снижению выбросов парниковых газов в животноводческих хозяйствах // *Пищевые Системы*. 2022. Т. 5, № 3. С. 202–211. doi: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211
9. Борисова О. В. Инновационные стратегии развития кожевенной промышленности Алтайского края на базе местного сельскохозяйственного сырья // *Вестник алтайской науки*. 2012. № 3-2. С. 89–93.
10. Planthoin D. K. Animal ethics and welfare in the fashion and lifestyle industries // *Green Fashion*. 2016. Vol. 2. P. 49–122. doi: 10.1007/978-981-10-0245-8\_3
11. Bayón B., Berti I. R., Gagnetten A. M. [et al.]. Biopolymers from wastes to high-value products in biomedicine // *Waste to wealth*. 2018. P. 1–44. doi: 10.1007/978-981-10-7431-8\_1
12. Wankhade V. Animal-derived biopolymers in food and biomedical technology // *Biopolymer-based formulations*. 2020. P. 139–152. doi: 10.1016/B978-0-12-816897-4.00006-0
13. Bugarčić M., Jovanović A., Petrović J. [et al.]. Advances in biopolymer production and applications: a comprehensive review of key biomaterials // *Metallurgical and Materials Data*. 2024. Vol. 2 (3). P. 81–98. doi: 10.56801/MMD37
14. Uranga J., Zarandona I., Andonegi M. [et al.]. Biopolymers derived from marine sources for food packaging applications // *Sustainable food packaging technology*. 2021. P. 35–56. doi: 10.1002/9783527820078.ch2
15. Shavandi A., Silva T. H., Bekhit A. A. [et al.]. Keratin: dissolution, extraction and biomedical application // *Biomater. Sci.* 2017. Vol. 5. P. 1699–1735. doi: 10.1039/C7BM00411G
16. Pourjavaheri F., Ostovar Pour S., Jones O. A. H. [et al.]. Extraction of keratin from waste chicken feathers using sodium sulfide and L-cysteine // *Process Biochem*. 2019. Vol. 82. P. 205–214. doi: 10.1016/j.procbio.2019.04.010
17. Poole A. J., Lyons R. E., Church J. S. Dissolving feather keratin using sodium sulfide for bio-polymer applications // *J Polym Environ*. 2011. Vol. 19. P. 995–1004. doi: 10.1007/s10924-011-0365-6
18. Goudarzi G., Dadashian F., Vatanara A. [et al.]. Straightforward and highly efficient feather keratin extraction by systematic optimization of sodium sulfide treatment pro-

- cess // Journal of Textiles and Polymers. 2023. Vol. 11, № 1. P. 57–67. doi: 10.48302/jtp.2023.409717.1268Singer
19. Singer S. J., Nicolson G. L. The Fluid Mosaic Model of the Structure of Cell Membranes // Science. 1972. Vol. 175. P. 720–731. doi: 10.1126/science.175.4023.720
  20. Franke W. W., Scheer U., Krohne G., Jarasch E. D. The nuclear envelope and the architecture of the nuclear periphery // J Cell Biol. 1981. Vol. 91, № 3. P. 39–50. doi: 10.1083/jcb.91.3.39s
  21. Walawalkar S., Almelkar S. Fabrication of aortic bioprosthesis by decellularization, fibrin glue coating and re-endothelialization: a cell scaffold approach // Prog Biomater. 2019. Vol. 8, № 3. P. 197–210. doi: 10.1007/s40204-019-00122-2
  22. Chernukha I., Kotenkova E., Derbeneva S. [et al.]. Bioactive compounds of porcine hearts and aortas may improve cardiovascular disorders in humans // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, № 14. P. 7330. doi: 10.3390/ijerph18147330

## References

1. Patshina M.V., Voroshilin R.A., Osintsev A.M. Analysis of the global biomaterials market to determine the potential of animal-based raw materials. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv = Equipment and technology for food production*. 2021;51(2):270–289. (In Russ.). doi: 10.21603/2074-9414-2021-2-270-289
2. Sayeed R., Tiwari P. Wealth from meat industry by-products and waste: a review. *Sustainable Food Waste Management: Concepts and Innovations*. 2020:191–208. doi: 10.1007/978-981-15-8967-6\_11
3. Said M.I. Characteristics of by-product and animal waste: a review. *Large Animal Review*. 2019;25(6):243–250.
4. Piercy E., Verstraete W., Ellis P.R. et al. A sustainable waste-to-protein system to maximise waste resource utilisation for developing food-and feed-grade protein solutions. *Green Chemistry*. 2023;25(3):808–832. doi: 10.1039/D2GC03095K
5. Shalavina E.V., Vasil'ev E.V. Improving environmental safety by developing technological regulations for the processing and use of livestock by-products. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2023;(1):141–154. (In Russ.). doi: 10.24412/2713-2641-2023-1114-141-154
6. Semenova A. Deep processing technologies as an import substitution strategy. *Myasnaya sfera = Meat sphere*. 2016;(1):48–49. (In Russ.)
7. Patshina M.V., Voroshilin R.A., Osintsev A.M. Global biomaterials market: potential opportunities for raw materials of animal origin. *Food processing: techniques and technology*. 2021;51(2):270–289. doi: 10.21603/2074-9414-2021-2-270-289
8. Petrunina I.V., Gorbunova N.A. Systematic measures to reduce greenhouse gas emissions in livestock farms. *Pishchevye Sistemy = Food systems*. 2022;5(3):202–211. (In Russ.). doi: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211
9. Borisova O.V. Innovative strategies for the development of the leather industry in the Altai Territory using local agricultural raw materials. *Vestnik altayskoy nauki = Bulletin of Altai science*. 2012;(3-2):89–93. (In Russ.)
10. Planthoin D.K. Animal ethics and welfare in the fashion and lifestyle industries. *Green Fashion*. 2016;2:49–122. doi: 10.1007/978-981-10-0245-8\_3
11. Bayón B., Berti I.R., Gagneten A.M. et al. Biopolymers from wastes to high-value products in biomedicine. *Waste to wealth*. 2018:1–44. doi: 10.1007/978-981-10-7431-8\_1
12. Wankhade V. Animal-derived biopolymers in food and biomedical technology. *Biopolymer-based formulations*. 2020:139–152. doi: 10.1016/B978-0-12-816897-4.00006-0
13. Bugarčić M., Jovanović A., Petrović J. et al. Advances in biopolymer production and applications: a comprehensive review of key biomaterials. *Metallurgical and Materials Data*. 2024;2(3):81–98. doi: 10.56801/MMD37

14. Uranga J., Zarandona I., Andonegi M. et al. Biopolymers derived from marine sources for food packaging applications. *Sustainable food packaging technology*. 2021;35–56. doi: 10.1002/9783527820078.ch2
15. Shavandi A., Silva T.H., Bekhit A.A. et al. Keratin: dissolution, extraction and biomedical application. *Biomater. Sci.* 2017;5:1699–1735. doi: 10.1039/C7BM00411G
16. Pourjavaheri F., Ostovar Pour S., Jones O.A.H. et al. Extraction of keratin from waste chicken feathers using sodium sulfide and L-cysteine. *Process Biochem.* 2019;82:205–214. doi: 10.1016/j.procbio.2019.04.010
17. Poole A.J., Lyons R.E., Church J.S. Dissolving feather keratin using sodium sulfide for bio-polymer applications. *J Polym Environ.* 2011;19:995–1004. doi: 10.1007/s10924-011-0365-6
18. Goudarzi G., Dadashian F., Vatanara A. et al. Straightforward and highly efficient feather keratin extraction by systematic optimization of sodium sulfide treatment process. *Journal of Textiles and Polymers.* 2023;11(1):57–67. doi: 10.48302/jtp.2023.409717.1268Singer
19. Singer S.J., Nicolson G.L. The Fluid Mosaic Model of the Structure of Cell Membranes. *Science.* 1972;175:720–731. doi: 10.1126/science.175.4023.720
20. Franke W.W., Scheer U., Krohne G., Jarasch E.D. The nuclear envelope and the architecture of the nuclear periphery. *J Cell Biol.* 1981;91(3):39–50. doi: 10.1083/jcb.91.3.39s
21. Walawalkar S., Almelkar S. Fabrication of aortic bioprosthesis by decellularization, fibrin glue coating and re-endothelialization: a cell scaffold approach. *Prog Biomater.* 2019;8(3):197–210. doi: 10.1007/s40204-019-00122-2
22. Chernukha I., Kotenkova E., Derbeneva S. et al. Bioactive compounds of porcine hearts and aortas may improve cardiovascular disorders in humans. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2021;18(14):7330. doi: 10.3390/ijerph18147330

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### **Никита Алексеевич Шутский**

кандидат биологических наук, доцент кафедры гистологии, цитологии и эмбриологии, Северный государственный медицинский университет (Россия, г. Архангельск, пр-кт Троицкий, 51); доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

E-mail: nikitashutskij@rambler.ru

##### **Сергей Леонидович Кашутин**

доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой кожных и венерических болезней, Северный государственный медицинский университет (Россия, г. Архангельск, пр-кт Троицкий, 51)

E-mail: sergeycash@yandex.ru

##### **Nikita A. Shutskiy**

Candidate of biological sciences, associate professor of the sub-department of histology, cytology and embryology, Northern State Medical University (51 Troitskiy avenue, Arkhangelsk, Russia); associate professor of the sub-department of biology, ecology, and biotechnology, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17 Severnoy Dviny embankment, Arkhangelsk, Russia)

##### **Sergey L. Kashutin**

Doctor of medical sciences, associate professor, head of the sub-department of skin and venereal diseases, Northern State Medical University (51 Troitskiy avenue, Arkhangelsk, Russia)

***Николай Сергеевич Феленко***

ассистент кафедры хирургии, Северный  
государственный медицинский  
университет (Россия, г. Архангельск,  
пр-кт Троицкий, 51)

E-mail: nikolaifelenko@yandex.ru

***Nikolay S. Felenko***

Assistant of the sub-department of surgery,  
Northern State Medical University  
(51 Troitskiy avenue, Arkhangelsk, Russia)

***Елена Дмитриевна Кубасова***

кандидат биологических наук, декан  
фармацевтического факультета,  
Северный государственный медицинский  
университет (Россия, г. Архангельск,  
пр-кт Троицкий, 51)

E-mail: lapkino2001@mail.ru

***Elena D. Kubasova***

Candidate of biological sciences,  
dean of the faculty of pharmacy,  
Northern State Medical University  
(51 Troitskiy avenue, Arkhangelsk, Russia)

***Денис Владимирович Мизгирев***

доктор медицинских наук, профессор  
кафедры хирургии, Северный  
государственный медицинский  
университет (Россия, г. Архангельск,  
пр-кт Троицкий, 51)

E-mail: denimsur@rambler.ru

***Denis V. Mizgirev***

Doctor of medical sciences, professor  
of the sub-department of surgery,  
Northern State Medical University  
(51 Troitskiy avenue, Arkhangelsk, Russia)

***Олег Витальевич Калмин***

доктор медицинских наук, профессор,  
заведующий кафедрой анатомии  
человека, Медицинский институт,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ovkalmin@gmail.com

***Oleg V. Kalmin***

Doctor of medical sciences, professor,  
head of the sub-department of human  
anatomy, Medical Institute, Penza  
State University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 15.04.2025**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 06.06.2025**

**Принята к публикации / Accepted 22.06.2025**