

DOI: 10.7868/S3034574X26030072
УДК 60:577.11:577.15

Оригинальная статья

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА И АЛЬГИНАТА, СШИТЫХ ТРАНСГЛЮТАМИНАЗОЙ

Д.А. Кадималиев^{1,*}, С.Е. Шемяков², И.В. Сюсин¹, В.А. Трофимов¹,
С.Ю. Молоканова², И.Н. Чаиркин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, Российская Федерация

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

*E-mail: cadimded@yandex.ru

Аннотация. Оптимизированы условия получения и исследованы характеристики биоразлагаемых альгинат-желатиновых пленок, сшитых ферментом транслглютаминазой (mTGase). Свойства пленок зависели как от условий шивки, так и вида и соотношения исходных компонентов. Методами ИК-спектроскопии, микротомографии, растровой и сканирующей электронной микроскопии показано, что mTGase сшивает компоненты и улучшает физико-механические параметры пленок. Лучшие образцы пленок имели следующие характеристики: толщина — $103,1 \pm 5,2$ мкм, прочность — $32,3 \pm 2,4$ МПа, растяжение — $168,2 \pm 6,2\%$, паропроницаемость — $22,06 \pm 1,15 \times 10^{-8}$ г·мм/ч⁻¹·см⁻²·Па⁻¹. Биоразлагаемость пленок в почве составляла 30 ± 2 сут. Их можно использовать в качестве упаковки пищевых и медицинских изделий, для получения шовного материала, иммобилизации лекарственных препаратов с сохранением активности, заживления, нормализации и адаптации краев раны, защиты от воздействия внешних факторов.

Ключевые слова: биоразлагаемые полимеры, характеристики, фермент транслглютаминаза, альгинат, желатин, глицерин

Финансирование. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ООО «Техноальянс».

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Ссылка для цитирования: Кадималиев Д.А., Шемяков С.Е., Сюсин И.В., Трофимов В.А., Молоканова С.Ю., Чаиркин И.Н. Оптимизация условий получения и характеристики биоразлагаемых пленок на основе желатина и альгината, сшитых транслглютаминазой. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 3. С. 428–439.
<https://doi.org/10.7868/S3034574X26030072>

PRODUCTION CONDITION OPTIMIZATION AND CHARACTERISTICS OF BIODEGRADABLE FILMS BASED ON GELATIN AND ALGINATE CROSSLINKED WITH TRANSGLUTAMINASE

D.A. Kadimaliev^{1,*}, S.E. Shemyakov², I.V. Syusin¹, V.A. Trofimov¹, S.Y. Molokanova², I.N. Chairkin²

¹National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

²Pirogov Russian National Research Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Pirogov University), Moscow, Russian Federation

*E-mail: cadimded@yandex.ru

Abstract. The production conditions were optimized and the characteristics of biodegradable alginate-gelatin films cross-linked with the enzyme transglutaminase (mTGase) were investigated. The properties of the films depended both on the crosslinking conditions and on the type and ratio of the initial components. It has been shown by IR spectroscopy, microtomography, and scanning electron microscopy that mTGase cross-linked of components and improves the physico-mechanical parameters of films. The best samples of films had the following characteristics: thickness — 103.1 ± 5.2 microns, strength — 32.3 ± 2.4 MPa, tensile strength — 168.2 ± 6.2 %, vapor permeability — $22.06 \pm 1.15 \times 10^{-8}$ g·mm/h⁻¹·cm⁻²·Pa⁻¹. Biodegradability of films in soil it was 30 ± 2 days. They can be used as packaging of food and medical products, to obtain suture material for surgery, to link medicines to the film while maintaining activity, to heal and treatment wound edges, as well as to protect against external factors.

Keywords: biodegradable polymers, characteristics, enzyme transglutaminase, alginate, gelatin, glycerol

Funding. This work was supported in part by Technoalliance LLC.

Ethics declarations. This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

Conflict of interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Authors contribution. All authors have made a substantial contribution to the conception, research, and preparation of the article.

For citation: Kadimaliev D.A., Shemyakov S.E., Syusin I.V., Trofimov V.A., Molokanova S.Y., Chairkin I.N. Production condition optimization and characteristics of biodegradable films based on gelatin and alginate crosslinked with transglutaminase. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(3): 428–439. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26030072>

ВВЕДЕНИЕ

Создание биоразлагаемых материалов на основе смесей природных полимеров, которые могли бы под действием окружающей среды распадаться на безвредные для природы и живых организмов вещества, является одной из приоритетных задач современности [14, 31, 34]. Особый интерес вызывают полимеры, полученные из отходов, вторичного или возобновляемого природного сырья, таких как хитин, желатин, молочная сыворотка, полисахариды, соевый белок, биомасса и др. Эти материалы можно применять в производстве упаковочных изделий и композиционных материалов, пищевой промышленности, сельском хозяйстве, медицине, текстильной промышленности. Биополимеры в связи с совместимостью с биологическими тканями позволяют использовать их для получения шовного материала, а также пленок с иммобилизованными лекарствами, ускоряющими процессы заживления, нормализации и адаптации краев раны, защиты от воздействия внешних факторов [6, 7, 19, 20, 22–24, 29, 30].

Желатин — продукт переработки коллагена, распространенного в природе белкового вещества, образующего главную составную часть соединительной ткани позвоночных, особенно в коже, оссеине костей и в сухожилиях. По аминокислотному и элементарному составу желатин близок к коллагену. Желатин, извлекаемый из известковых оболочках, в качестве ингредиента в различных пищевых продуктах, а также в фармацевтике. Несъедобный, или технический желатин получают из отходов кожевенного производства [33].

Альгинаты являются полиуроновыми кислотами, продуцируются некоторыми видами бурых водорослей (*Phaeophyceae*) и бактерий (*Azotobacter vinelandii* и *Pseudomonas aeruginosa*). *Azotobacter vinelandii* синтезирует альгинат как внеклеточный полисахарид. Альгинат состоит из двух структурных единиц: остатков β-D-маннуриновой кислоты (М) и α-L-гулуриновой кислоты (Г), связанных 1,4-гликозидными связями [32].

В ряде работ показано, что желатин и белки в присутствии транслугтаминазы (mTGase) образуют вязкие гели, которые можно использовать для получения пленок и полимеров. В литературе имеются данные также о возможности получения различных материалов из желатина, хитозана, альгината, пектина и других биополимеров в различных сочетаниях и соотношениях, сшитых различными способами, в том числе химическим и ферментативными методами (ферментом транслугтаминазой). Причем качество материалов зависело от вида сырья и условий его получения [1, 10, 11, 17, 18, 35]. В частности, было показано, что mTGase можно использовать для получения желатин-хитозановых пленок. Однако физико-ме-

ханические характеристики пленок — прочность, растяжение относительно невысокие [24, 30], что ограничивало их широкое применение.

В предлагаемом исследовании показана технология и обоснованы методы получения биополимеров (пленок) из желатина и альгината, сшитых микробной транслугтаминазой (mTGase).

Цель работы — изучение влияния соотношения альгината желатина и микробной транслугтаминазы (mTGase) на свойства биоразлагаемых пленок на их основе.

МЕТОДИКА

Для получения биополимерных пленок в качестве структурообразователей использовали:

- натрия альгинат из водорослей Foodalga, марка 500 (Foodchem, Китай);
- желатин пищевой (10%-ный водный раствор (ГОСТ 11293-89, ООО «ДТ-холдинг», Россия));
- ферментный препарат mTGase EC 2.3.2.13 — PROBIND TX (BDF Natural Ingredients, SL., Испания). Количество вносимой mTGase рассчитывали по содержанию белка;
- глицерин (ГОСТ 6259-75, ООО «Глицерин.ру», Россия).

Пленки получали следующим образом. Желатин растворяли в воде в соотношении 1:10 при температуре 60 °С. Смешивали с раствором альгината натрия (1–2%-ный водный раствор с температурой 60–80 °С) и в последнюю очередь добавляли mTGase (20%-ный водный раствор по белку), глицерин. После внесения фермента суспензию перемешивали не более 2 мин, температура смеси 45–55 °С. Полученную массу выливали в посуду с горизонтальным дном и выдерживали в течение 1–2 сут при температуре +20–24 °С.

Количественное содержание белка определяли методом Бредфорда [4].

Толщину пленок определяли на приборе CHY-C2 “Labthink Instruments” (Китай), предел прочности и растяжение на универсальной испытательной машине XLW(PC) “Labthink Instruments” (Китай), в соответствии с Международным стандартом (<https://catalogue.normdocs.ru/catalog/com.normdocs.astm.card.d882-12/Standard-ASTM-D882-12>). Паропроницаемость пленок $WVP = (г \times мм / ч^{-1} \times см^{-2} \times Па^{-1} \times 10^{-8})$ определяли гравиметрическим методом (ГОСТ-21472-81. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартиформ. 2008). Биоразлагаемость пленок определяли по количеству дней или месяцев, необходимых для ее деградации [24].

Исследование образования и разрыва связей, микроструктуру и структурные особенности пленок проводили методами ИК-спектроскопии, томографии, электронной растровой и сканирующей

шей микроскопии. ИК-спектры регистрировали в диапазоне 4000–800 см⁻¹ на ИК-Фурье спектрометре IRPrestige-21 “Shimadzu” (Япония). Микрофотографию проводили с помощью микрофотографа SkyScan-1172 “SkyScan n.v.” (Бельгия). Результаты реконструкции микрофотографий анализировали в прилагаемом комплексе программ: STan, STvol, STvox, STviewer. Электронную и сканирующую микроскопию проводили на многофункциональном растровом электронном микроскопе Quanta 200i 3D FEI “SEM Quanta 200i 3D FEI Company” (USA-Holland) и зондовом микроскопе SPM9600 “Shimadzu” (Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что эффективность сшивки белков и полисахаридов с использованием mTGase зависит как от химической структуры полимеров, так и от условий его применения. Например, в ряде работ показано, что mTGase может сшивать различные биополимеры, в том числе желатин, по свободным аминогруппам и аминогруппам лизина. Эффективность такой сшивки зависит не только от природы гелеобразующих систем, но и вида mTGase. При использовании в качестве гелеобразующих систем только желатина сформированные пленки по своим параметрам уступают пленкам из синтетических полимеров, так как получаются ломкими. Для увеличения пластичности пленок в гелеобразующие смеси добавляют пластификатор (глицерин, полиэтиленгликоль и т. д.), а для повышения физико-механических свойств — различные армирующие наполнители, например, полисахариды: альгинат, целлюлозу, хитозан [8–11, 15, 17, 18, 24, 35].

Проведенные исследования показали, что характеристики пленок зависят от соотношения компонентов и количества внесенного фермента. Пленки, сформированные из желатина и глицерина с использованием сшивки ферментом, имели низкие физико-химические показатели и со временем теряли эластичность, по краям становились ломкими. Добавление альгината повышало эластичность и улучшало физико-механические показатели пленок. Лучшие образцы были получены при соотношении компонентов, масс. %: желатин — 48,4±2,7; альгинат натрия — 29,3±2,5; mTGase — 16,1±0,9; глицерин — 3,2±0,1. Пленки имели следующие характеристики: толщина — 103,1±5,2 мкм, прочность — 32,3 ± 2,4 МПа, растяжение — 168,2±6,2 %, паропроницаемость — 22,06±1,15×10⁻⁸ г·мм/ч⁻¹·см⁻²·Па⁻¹. Биоразлагаемость пленок зависела от состава пленок и составляла от 30±5 сут.

По своим характеристикам они не уступали биологически не разлагаемому полиэтилену, применяемому в производстве упаковочных материалов, а также биоразлагаемым пленкам на основе

желатина, хитозана, сшитых mTGase [10, 15, 24, 28]. Изменение количества альгината влияло на физико-механические показатели пленок. Это может быть связано со структурными факторами, ответственными за взаимодействие между полимерами в растворе: возрастанием размера полимерной молекулы, уменьшением степени доступности пространства, возрастанием жесткости биополимерной молекулы. Характеристики пленок зависели также от количества внесенного фермента. Увеличение количества внесенного фермента, выше оптимального, не оказывало существенного влияния на прочность, растяжение и толщину пленок, хотя процесс структурирования проходил быстрее. Это можно объяснить следующими причинами. Во-первых, по-видимому, при высоких концентрациях фермента наблюдался эффект насыщения субстратом, так как при неизменном количестве желатина количество функциональных групп, по которым происходила ферментативная сшивка, также оставалось неизменным. Во-вторых, можно полагать, что при высоких концентрациях катализатора в вязких средах происходила ретикуляция ферментов, то есть ферменты, обладая полифункциональностью, сами выступали в качестве доноров аминогрупп. Кроме того, нельзя исключить и увеличение вклада во взаимодействия между карбоксильными группами альгината и аминогруппами фермента. Наличие паропроницаемости у пленок указывало на то, что они «дышат», и это свойства пленок очень важно для применения в медицине и пищевой промышленности.

С целью изучения и оценки структурных изменений при образовании связей между компонентами, происходящих в результате добавления в смесь mTGase, проводили томографию, атомно-силовую, сканирующую микроскопию и регистрацию ИК-спектров контрольных и опытных образцов пленок.

На рис. 1 б четко видна слоистая структура материала, в отличие от рис. 1 а, где отсутствовала какая-либо слоистость и пленка представляла собой целостную структуру. Это связано с тем, что при добавлении фермента mTGase в композицию образуются прочные ковалентные связи между компонентами смеси и происходит выравнивание структуры материала во всем объеме пленки и образование монолитного рисунка.

Для получения достоверной информации о характере рельефа поверхности пленок проводили анализ в атомно-силовом (растровом) (рис. 2) и сканирующем зондовом микроскопах опытных и контрольных образцов (рис. 3).



Рис. 1. Микротомография контрольных и опытных образцов: а — биополимерная пленка без фермента; б — биополимерная пленка с ферментом
Fig. 1. Micro-CT of control and experimental samples: a — biopolymer film without enzyme; b — biopolymer film with enzyme

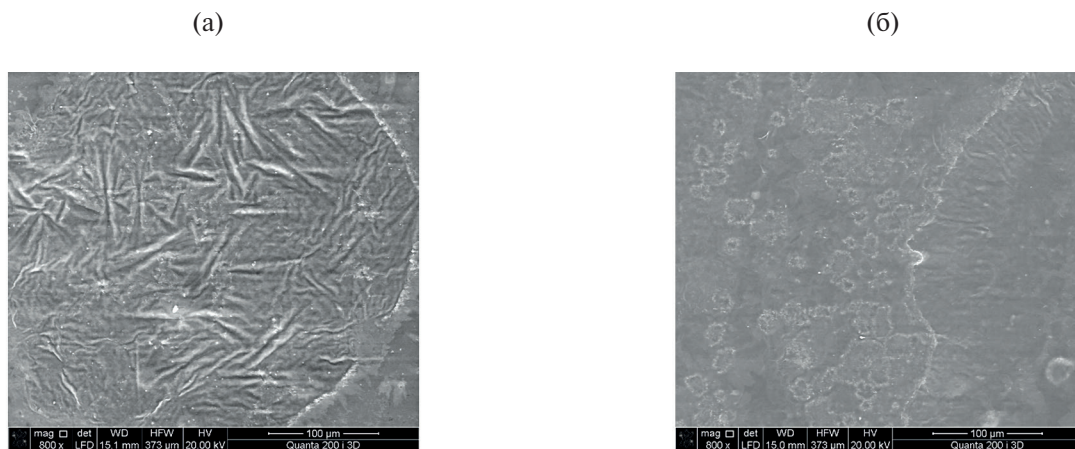


Рис. 2. Фотографии пленок, полученных на атомно-силовом (растровом) микроскопе: а — биополимерная пленка без mTGase; б — биополимерная пленка с mTGase
Fig. 2. Atomic force microscopy (AFM) images of the films: a — biopolymer film without mTGase; b — biopolymer film with mTGase

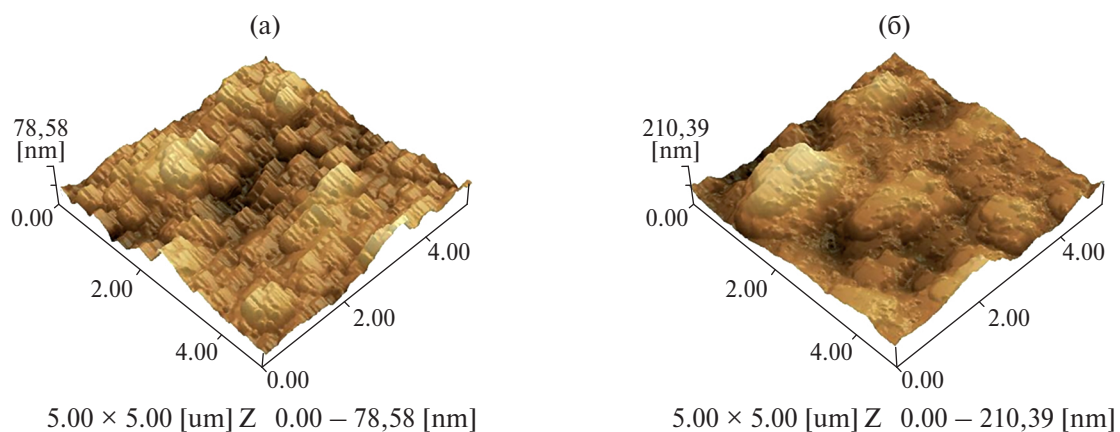


Рис. 3. Фотографии пленок, полученных на сканирующем (зондовом) микроскопе. а — биополимерная пленка без mTGase; б - биополимерная пленка с mTGase
Fig. 3. Scanning probe microscopy (SPM) images of the films: a — biopolymer film without mTGase; b — biopolymer film with mTGase

Полученные результаты подтвердили то, что при добавлении фермента mTGase в композицию образуются прочные связи между компонентами смеси и происходит выравнивание структуры материала во всем объеме пленки и образование монолитного рисунка.

Фотографии пленок, полученных на сканирующем микроскопе, также показали положительную роль mTGase в образовании монолитной однообразной структуры пленок (рис. 3).

В пленках без mTGase наблюдалась ребристость и неровность (а), а пленки с mTGase имели более гладкую и ровную поверхность (б).

Исходя из вышеприведенных результатов, можно сделать вывод о том, что при добавлении альгината вместе с ферментом mTGase в композиции образуются прочные ковалентные и координационные связи между компонентами смеси и происходит выравнивание структуры материала по всей поверхности и глубине пленки. Для подтверждения этого были исследованы ИК-спектры на наличие свободных и связанных функциональных групп компонентов, составляющих пленки (рис. 4), и пленок, полученных сшивкой этих компонентов с помощью mTGase (рис. 5).

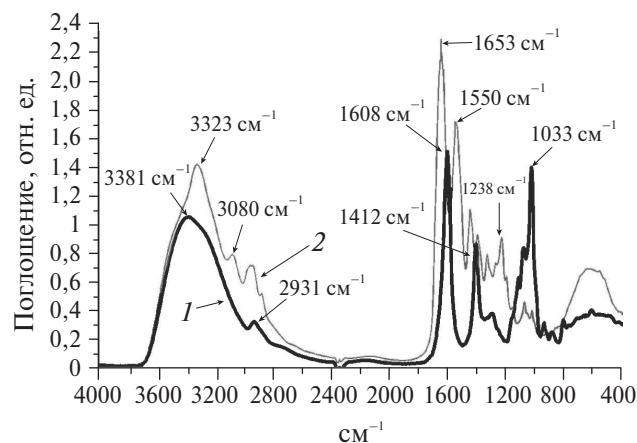


Рис. 4. ИК-спектры пленок из альгината (1) и желатина (2)

Fig. 4. FT-IR spectra of alginate (1) and gelatin (2) films

В ИК-спектрах пленок желатина (рис. 4) присутствовали пики поглощения, характерные для данного белка: в области 3323 см^{-1} , обусловленные колебаниями амида А (NH), 3080 см^{-1} — валентными колебаниями связанных (ассоциированных) NH групп аминокислот (лизина), 1653 см^{-1} — колебаниями амид I (CO, NH), 1550 см^{-1} — колебаниями амид II (CH₂, NH), 1238 см^{-1} — колебаниями амид III (CN, NH), и $1200\text{--}1020\text{ см}^{-1}$ — колебаниями (CN) алифатических аминов. Колебания в области 1238 см^{-1} характерны для лизина, а для глутаминовой кислоты, глицина и аргинина в области $1200\text{--}1020\text{ см}^{-1}$. В ИК-спектрах альгината (рис. 4) хорошо заметны

пики поглощения, характерные для данного полисахарида: 3381 см^{-1} — колебания свободных OH-групп, 2931 см^{-1} — колебания CH₂-групп, 1608 см^{-1} и 1412 см^{-1} — ассиметричные и симметричные колебания карбоксилат-ионных групп, 1033 см^{-1} — колебания C-O-C групп сахаров [2, 12, 21, 25, 26, 36].

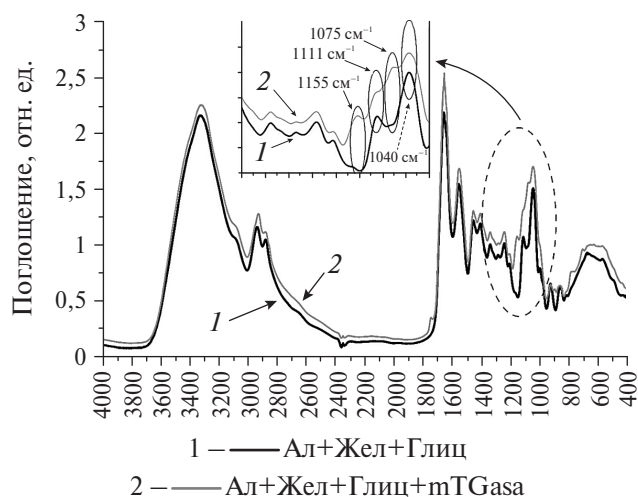


Рис. 5. ИК-спектры пленок: 1 — альгинат — желатин — глицерин; 2 — альгинат — желатин — глицерин — mTGase

Fig. 5. FT-IR spectra of the films: 1 — alginate — gelatin — glycerol; 2 — alginate — gelatin — glycerol — mTGase

В ИК-спектрах пленок из смеси альгинат-желатин-глицерин без фермента (рис. 5) наблюдалось поглощение в области 1040 см^{-1} , 1111 см^{-1} , обусловленных ассиметричными и симметричными колебаниями карбоксилат-ионных групп альгината. Вероятно, это связано с тем, что в водной среде при смешивании происходит частичная диссоциация молекул альгината натрия с образованием свободных карбоксильных групп [13, 26]. В ИК-спектрах пленок из смеси альгинат-желатин-глицерин с ферментом mTGase регистрируются заметные изменения в области «отпечатки пальцев» — 1000 см^{-1} — 1400 см^{-1} . Поглощение в области 1040 см^{-1} и 1111 см^{-1} менее выражено, но наблюдается незначительная полоса при 1075 см^{-1} и четко регистрируется полоса поглощения при частоте 1155 см^{-1} , характерная для аминогрупп алифатических аминокислот, что, вероятно, связано со смещением максимума полос поглощения аминогрупп алифатических аминокислот и, прежде всего, лизина в область более низких частот за счет образования новых связей (сшивки) и электростатического взаимодействия аминогрупп желатина с карбоксильными группами альгината. Об этом свидетельствует также то, что добавление желатина к альгинату приводит к смещению полос, обусловленных карбоксилат-ионными группами альгината после диссоциации и полос, обусловленных связанными

ми NH-группами. Например, при исследовании ИК-спектров гелеобразных пленок, полученных из растворов желатины с добавками альгината натрия, показано, что с увеличением содержания альгината натрия наблюдалось изменение структуры формирующихся пленок. При этом отмечалось смещение характеристической полосы поглощения амидных групп желатины. При исследовании рыбной желатины в присутствии полисахарида каррагинана также наблюдались смещения основных полос пропускания амидных групп желатины вследствие формирования полиэлектролитных комплексов желатины типа А с полисахаридом [5, 13, 27].

Снижение интенсивности пика поглощения в области 1111 см^{-1} при ферменте, по-видимому, связано с образованием новых связей (вероятно, CN) или между свободными аминогруппами, или боковыми аминогруппами и карбоксимидными группами лизина. Нельзя исключить и образование координационных связей за счет электростатических взаимодействий. Возможность такого механизма взаимодействия между полисахаридами и белками показана в работах [5, 13, 16, 27]. Образование таких взаимодействий в альгинат-желатиновых пленках можно изобразить следующей схемой, представленной на рис. 6.

В опытном образце в присутствии mTGase, даже с учетом того, что фермент также содержит аминогруппы, заметных изменений в области 3325 см^{-1} , обусловленных колебаниями амида А (NH), свободных аминогрупп желатина и фермента не наблюдалось, что может свидетельствовать о незначительном участии или неучастии этих групп в процессах сшивки.

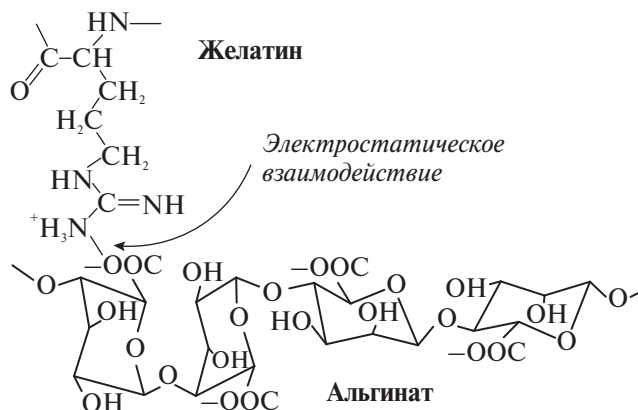


Рис. 6. Возможные механизмы образования координационных (электростатических) связей между альгинатом и желатином при формировании пленок
Fig. 6. Proposed mechanisms for the formation of coordination (electrostatic) bonds between alginate and gelatin during film formation

Таким образом, по обнаружению изменений полос поглощения в ИК-спектрах в области 1040 см^{-1} , 1075 см^{-1} , 1111 см^{-1} и 1155 см^{-1} можно судить об эффективности сшивки полисахаридов (альгината натрия) и белков (желатин) ферментом mTGase и координационными связями при формировании гелей и пленок.

Для проверки биоразлагаемости полученных пленок проводилась их деструкция в естественных условиях среды при непосредственном контакте почвы с пленкой. Данные по деструкции пленок представлены на рис. 7.

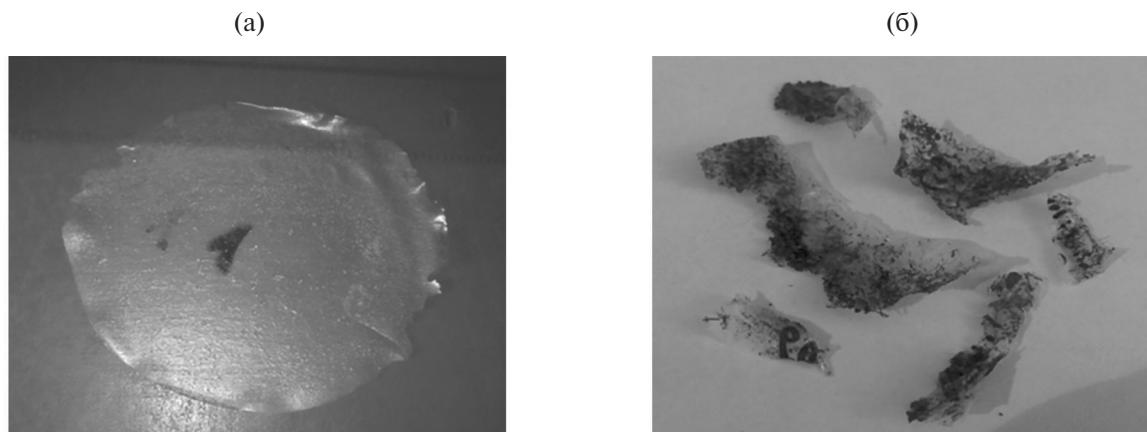


Рис. 7. Биоразлагаемость пленок: а — исходная пленка до внесения в почву; б — пленка через 30 сут после внесения в почву

Fig. 7. Biodegradability of the films: а — initial film before soil burial; б — film 30 days after soil burial

Из представленных рисунков видно, что в естественных условиях в почве через 30 сут полученная пленка подверглась разрушению (деструкции).

В результате проведенных исследований выявлено, что применение mTGase способствует ускорению гелеобразования смеси альгинат–желатин–глицерин за счет «сшивки», которая позволяла

формировать биоразлагаемые паропроницаемые пленки, по своим физико-механическим характеристикам не уступающие пленкам из полиэтилена и пленкам на основе хитозана и желатина, сшитых mTGase. Полученные пленки можно использовать для изготовления упаковочных материалов, а также в медицине в качестве матрицы для иммобилизации лекарственных препаратов, обладающих антибактериальными и регенерирующими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aleksandrova L., Uspenskaya M., Elangwe C., Ishevskiy A.* Architectonics of gelatin/biopolymer/transglutaminase for packaging films: a review // *Int. J. Biol. Macromol.* 2025. 2. 320. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145923>.
2. *Arrondo J.L.R., Muga A., Castresana J., Goni F.M.* Quantitative studies of the structure of proteins in solution by fourier-transform infrared spectroscopy // *Progr. Biophys. Mol. Biol.* 1992. V. 59. P. 23–56. [https://doi.org/10.1016/0079-6107\(93\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0079-6107(93)90006-6)
3. ASTM D882-12. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. ASTM International. West Conshohocken. PA. 2012.
4. *Bradford M.M.* A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // *Anal. Biochem.* 1976. V. 72. P. 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
5. *Devi N., Kumar M.* Genipin crosslinked microcapsules of gelatin A and j-carrageenan polyelectrolyte complex for encapsulation of Neem (*Azadirachta Indica A.Juss.*) seed oil // *Polym. Bull.* 2010. V. 65. P. 347–362. <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0246-5>
6. *Kadimaliev D.A., Kezina E.V., Telyatnik V.I., et al.* Residual Brewer's yeast biomass and bacterial cellulose as an alternative to toxic phenol-formaldehyde binders in production of pressed materials from waste wood // *BioResources.* 2015. V. 10. № 1. P. 1644–1656. <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1644-1656>
7. *Kadimaliev D.A., Telyatnik V.I., Revin V.V., et al.* Optimization of the conditions required for chemical and biological modification of the yeast waste from beer manufacturing to produce adhesive compositions // *BioResources.* 2012. V. 7. № 2. P. 1984–1993. <https://doi.org/10.15376/biores.7.2.1984-1993>
8. *Kaewudom P., Benjakul S., Kijroongrojana K.* Effect of bovine and fish gelatin in combination with microbial transglutaminase on gel properties of threadfin bream surimi // *International Aquatic Research.* 2012. V. 4. P. 1–12. <https://doi.org/10.1186/2008-6970-4-12>
9. *Kaliampakou C., Lagopati N., Pavlatou E.A., Costas A., Charitidis C.A.* Alginate–Gelatin Hydrogel Scaffolds; An Optimization of Post-Printing Treatment for Enhanced Degradation and Swelling Behavior // *Gels.* 2023. V. 9. № 857. P. 1–31. <https://doi.org/10.3390/gels9110857>
10. *Liu F., Majeed H., Antoniou J., et al.* Tailoring physical properties of transglutaminase-modified gelatin films by varying drying temperature // *Food Hydrocolloids.* 2016. V. 58. P. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.007>
11. *Pilipenko N., Gonçalves O.H., Bonac F., et al.* Tailoring swelling of alginate–gelatin hydrogel microspheres by crosslinking with calcium chloride combined with transglutaminase // *Carbohydrate Polymers.* 2019. 223. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115035>
12. *Prystupa D.A., Donald A.M.* Infrared study of gelatin conformations in the gel and sol states // *Polymer Gels and Networks.* 1996. V. 4. P. 87–110. [https://doi.org/10.1016/0966-7822\(96\)00003-2](https://doi.org/10.1016/0966-7822(96)00003-2)
13. *Shi J., Alves N.M., Mano J.F.* Chitosan coated alginate beads containing poly(N-isopropylacrylamide) for dual-stimuli-responsive drug release // *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2007. V. 84B. № 2. P. 595–603. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30907>
14. *Siracusa V., Rocculi P., Romani S., Rosa M.D.* Biodegradable polymers for food packaging: a review // *Trends in Food Science & Technology.* 2008. V. 19. P. 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
15. *Sun C.-K., Ke C.-J., Lin Y.-W. et al.* Transglutaminase Cross-Linked Gelatin–Alginate–Antibacterial Hydrogel as the Drug Delivery–Coatings for Implant–Related Infections // *Polymers.* 2021. V. 13. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/polym13030414>

16. Xiao C., Liu H., Lu Y., Zhang L. Blend films from sodium alginate and gelatin solutions // J. Macromol. Sci. Appl. Chem. 2001. 38. V. 38. № 3. P. 317–328. <https://doi.org/10.1081/MA-100103352>
17. Xiaomeng Wu., Wang K., Liu Y., Liu A., Ran Ye. Microstructure of transglutaminase-induced gelatin-natamycin fungistatic composite films // Int. J. Food Prop... 2017. V. 20. № 12. P. 3191–3203. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1280679>
18. Александрова Л.В., Успенская М.В., Максимова Я.И. и др. Влияние трансглутаминазы на свойства желатин-хитозановых пленок // Известия СПбГТИ (ТУ). Химия и технология высокомолекулярных соединений. 2025. № 72 (98). С. 41–48. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2025-72-98-41-48>
19. Алексеев К.В., Блынская Е.В., Тихонова Н.В. Полимеры в технологии создания лекарственных форм с модифицированным высвобождением // Российский химический журнал. 2010. № 6. С. 87–93.
20. Андреев Д.Ю., Парамонов Б.А., Мухтарова А.М. Современные раневые покрытия. Часть I // Вестник хирургии. 2009. Т. 168. № 3. С. 98–102.
21. Васильев А.В. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений. СПбГЛТА. СПб. 2007. 57 с.
22. Громовых Т.И., Садыкова В.С., Луценко С.В. и др. Бактериальная целлюлоза, синтезируемая *Gluconacetobacter Hansenii*, для использования в медицине // Прикл. биохимия и микробиология. 2017. Т. 53. № 1. С. 69–75. <https://doi.org/10.7868/S0555109917010093>
23. Кадималиев Д.А., Девятаева А.В., Грунюшкин И.П., Малафеева А.Н., Ревин В.В. Влияние модификации гель-пленки бактериальной целлюлозы на ее механические свойства и способность ковалентно связывать ферменты // Высокомолекулярные соединения. Серия б. 2021. Т. 63. № 3. С. 1–7. <https://doi.org/10.31857/S2308113921030086>
24. Кадималиев Д.А., Парчайкина О.В., Сюсин И. В. и др. Влияние трансглутаминазы на свойства пленок на основе хитозана и желатина // Прикл. биохимия и микробиология. 2021. Т. 57. № 3. С. 1–8. <https://doi.org/10.31857/S0555109921030041>
25. Казыцына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение ИК-, УФ-, ЯМР-спектроскопии в органической химии. Учеб. пособие для вузов. Высшая школа. М. 1971. 264 с.
26. Красочко П.А., Красочко И.А., Капуцкий Ф.Н., Зубец О.В., Аладьева Т.А. Оценка качества адьювантов и сорбентов на основе полисахаридов растительного происхождения // Эпизоотология, иммунобиология, фармакология, санитария. 2014. № 1. С. 62–67.
27. Маклакова А.А., Воронько Н.Г., Деркач С.Р., Кадырова Г.И., Зотова К.В. Взаимодействие желатины с κ -карагинаном по данным ИК-спектроскопии // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 53–60.
28. Патент РФ. 2015. №256824.
29. Патент РФ. 2020. №2720099.
30. Патент РФ. 2024. №2813119.
31. Рыбкина С.П., Пахаренко В.А., Шостак Т.С., Пахаренко В.В. Основные направления в области создания биоразлагаемых термопластов // Пластические массы. 2008. № 10. С. 47–54.
32. Савченко О.В. Полисахариды водорослей // Биология моря. 2003. № 6. С. 172.
33. Семчиков Ю.Д. Высокомолекулярные соединения: Учебник для вузов. Академия. М. 2005. 269 с.
34. Фомин В.А., Гузев В.А. Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования // Пластические массы. 2001. № 2. С. 42–48.
35. Шлейкин А.Г., Шаталов И.С., Шаталова А.С. Влияние трансглутаминазы на механические характеристики упаковочного материала на основе желатина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2. С. 1–6.
36. Ямпольская Г.П., Тарасевич Б.Н., Еленский А.А. Вторичная структура глобулярных белков в адсорбционных слоях на границе фаз раствор-воздух по данным ик-спектроскопии с фурье-преобразованием // Коллоидный журнал. 2005. Т. 67. № 3. С. 426–432.

REFERENCES

1. Aleksandrova L., Uspenskaya M., Elangwe C., Ishevskiy A. Architectonics of gelatin/biopolymer/transglutaminase for packaging films: a review // Int. J. Biol. Macromol. 2025. 2. 320. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145923>
2. Arrondo J.L.R., Muga A., Castresana J., Goni F.M. Quantitative studies of the structure of proteins in solution by fourier-transform infrared spectroscopy // Progr. Biophys. Mol. Biol. 1992. V. 59. P. 23–56. [https://doi.org/10.1016/0079-6107\(93\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0079-6107(93)90006-6)

3. ASTM D882-12. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. ASTM International. West Conshohocken. PA. 2012.
4. Bradford M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // *Anal. Biochem.* 1976. V. 72. P. 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
5. Devi N., Kumar M. Genipin crosslinked microcapsules of gelatin A and j-carrageenan polyelectrolyte complex for encapsulation of Neem (*Azadirachta Indica A.Juss.*) seed oil // *Polym. Bull.* 2010. V. 65. P. 347–362. <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0246-5>
6. Kadimaliev D.A., Kezina E.V., Telyatnik V.I., et al. Residual Brewer's yeast biomass and bacterial cellulose as an alternative to toxic phenol-formaldehyde binders in production of pressed materials from waste wood // *BioResources.* 2015. V. 10. № 1. P. 1644–1656. <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1644-1656>
7. Kadimaliev D.A., Telyatnik V.I., Revin V.V., et al. Optimization of the conditions required for chemical and biological modification of the yeast waste from beer manufacturing to produce adhesive compositions // *BioResources.* 2012. V. 7. № 2. P. 1984–1993. <https://doi.org/10.15376/biores.7.2.1984-1993>
8. Kaewudom P., Benjakul S., Kijroongrojana K. Effect of bovine and fish gelatin in combination with microbial transglutaminase on gel properties of threadfin bream surimi // *International Aquatic Research.* 2012. V. 4. P. 1–12. <https://doi.org/10.1186/2008-6970-4-12>
9. Kaliampakou C., Lagopati N., Pavlatou E.A., Costas A., Charitidis C.A. Alginate–Gelatin Hydrogel Scaffolds; An Optimization of Post-Printing Treatment for Enhanced Degradation and Swelling Behavior // *Gels.* 2023. V. 9. № 857. P. 1–31. <https://doi.org/10.3390/gels9110857>
10. Liu F., Majeed H., Antoniou J., et al. Tailoring physical properties of transglutaminase-modified gelatin films by varying drying temperature // *Food Hydrocolloids.* 2016. V. 58. P. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.007>
11. Pilipenko N., Gonçalves O.H., Bonac F., et al. Tailoring swelling of alginate-gelatin hydrogel microspheres by crosslinking with calcium chloride combined with transglutaminase // *Carbohydrate Polymers.* 2019. 223. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115035>
12. Prystupa D.A., Donald A.M. Infrared study of gelatin conformations in the gel and sol states // *Polymer Gels and Networks.* 1996. V. 4. P. 87–110. [https://doi.org/10.1016/0966-7822\(96\)00003-2](https://doi.org/10.1016/0966-7822(96)00003-2)
13. Shi J., Alves N.M., Mano J.F. Chitosan coated alginate beads containing poly(N-isopropylacrylamide) for dual-stimuli-responsive drug release // *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2007. V. 84B. № 2. P. 595–603. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30907>
14. Siracusa V., Rocculi P., Romani S., Rosa M.D. Biodegradable polymers for food packaging: a review // *Trends in Food Science & Technology.* 2008. V. 19. P. 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
15. Sun C.-K., Ke C.-J., Lin Y.-W., et al. Transglutaminase Cross-Linked Gelatin-Alginate-Antibacterial Hydrogel as the Drug Delivery-Coatings for Implant-Related Infections // *Polymers.* 2021. V. 13. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/polym13030414>
16. Xiao C., Liu H., Lu Y., Zhang L. Blend films from sodium alginate and gelatin solutions // *J. Macromol. Sci. Appl. Chem.* 2001. 38. V. 38. № 3. P. 317–328. <https://doi.org/10.1081/MA-100103352>
17. Xiaomeng Wu., Wang K., Liu Y., Liu A., Ran Ye. Microstructure of transglutaminase-induced gelatin-natamycin fungistatic composite films // *Int. J. Food Prop...* 2017. V. 20. № 12. P. 3191–3203. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1280679>
18. Alexandrova L.V., Uspenskaya M.V., Maksimova Ya.I., et al. Effect of transglutaminase on the properties of gelatin-chitosan films // *Izvestiya SPbGTI (TU). Khimiya i tekhnologiya vysokomolekulyarnykh soedineniy [Chemistry and technology of high-molecular compounds].* 2025. No. 72 (98), pp. 41–48. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2025-72-98-41-48>
19. Alekseev K.V., Blynskaya E.V., Tikhonova N.V. Polymers in the technology of creating modified-release dosage forms // *Russian Chemical Journal.* 2010. No. 6. pp. 87–93.
20. Andreev D.Yu., Paramonov B.A., Mukhtarova A.M. Modern wound coverings. Part I // *Bulletin of Surgery.* 2009. Vol. 168, No. 3, pp. 98–102.
21. Vasiliev A.V. Infrared spectroscopy of organic and natural compounds. SPbGLTA. SPb. 2007. 57 p.
22. Gromovych T.I., Sadykova V.S., Lutsenko S.V., et al. Bacterial cellulose synthesized by *Gluconacetobacter Hanseni* for use in medicine. *biochemistry and microbiology.* 2017. Vol. 53. no 1. pp. 69–75. <https://doi.org/10.7868/S0555109917010093>
23. Kadimaliev D.A., Devyataeva A.V., Grunuyshkin I.P., Malafeeva A.N., Revin V.V. Effect of modification of the gel film of bacterial cellulose on its mechanical properties and ability to covalently bind enzymes // *B. Series b.* 2021. Vol. 63. no. 3. P. 1–7. <https://doi.org/10.31857/S2308113921030086>

24. *Kadimaliev D.A., Parchaikina O.V., Syusin I.V., et al.* Effect of transglutaminase on the properties of films based on chitosan and gelatin // Прикл. biochemistry and microbiology. 2021. Vol. 57. No. 3. pp. 1–8. <https://doi.org/10.31857/S0555109921030041>
25. *Kazitsyna L.A., Kupletska N.B.* Application of IR, UV, and NMR spectroscopy in organic chemistry. Textbook for universities. Higher School, Moscow, 1971, 264 p.
26. *Krasochko P.A., Krasochko I.A., Kaputsky F.N., Zubets O.V., Aladyeva T.A.* Quality assessment of adjuvants and sorbents based on plant polysaccharides // Epizootology, immunobiology, pharmacology, sanitation. 2014. No. 1. pp. 62–67.
27. *Maklakova A.A., Voronko N.G., Derkach S.R., Kadyrova G.I., Zotova K.V.* Interaction of gelatin with k-carrageenan according to IR spectroscopy data. 2014. Vol. 17, No. 1, pp. 53–60.
28. Patent of the Russian Federation No. 256824, 2015.
29. Patent of the Russian Federation. 2020. No. 2720099.
30. Patent of the Russian Federation. 2024. No. 2813119.
31. *Rybkina S.P., Pakhareno V.A., Shostak T.S., Pakhareno V.V.* Main directions in the field of creating biodegradable thermoplastics. 2008. No. 10, pp. 47–54.
32. *Savchenko O.V.* Polysaccharides of algae. 2003. No. 6. p. 172.
33. *Semchikov Yu.D.* High-molecular compounds: Textbook for universities. Akademiya, Moscow, 2005, 269 p. (in Russian)
34. *Fomin V.A., Guzeev V.A.* Biodegradable polymers, state and prospects of use // Plastic masses. 2001. No. 2. pp. 42–48.
35. *Shleikin A.G., Shatalov I.S., Shatalova A.S.* Effect of transglutaminase on the mechanical characteristics of gelatin-based packaging material. Series «Processes and apparatuses of food production». 2014. No. 2. pp. 1–6.
36. *Yampolskaya G.P., Tarasevich B.N., Elenskiy A.A.* Secondary structure of globular proteins in adsorption layers at the solution-air phase boundary according to Fourier transform IR spectroscopy, Colloid Journal. 2005. Vol. 67, No. 3, pp. 426–432.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кадималиев Давуд Али-оглы — доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарева», Саранск, Российская Федерация

E-mail: cadimded@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5408-1692>

Шемяков Сергей Евгеньевич — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии человека ИАМ, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет), Москва, Российская Федерация

E-mail: shemy-akov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6272-3026>

Сюсин Илья Владимирович — кандидат биологических наук, доцент кафедры биотехнологии и биохимии, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский МГУ им. Н.П. Огарева», Саранск, Российская Федерация

E-mail: ilya.sysin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4993-6040>

Трофимов Владимир Александрович — доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры нормальной и патологической физиологии ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарева», Саранск, Российская Федерация

E-mail: geneticalab@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1294-1417>

ABOUT THE AUTHORS

Kadimaliev, Davud A. — Doctor of Biological Sciences, Professor, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

E-mail: cadimded@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5408-1692>

Shemyakov, Sergey E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Human Anatomy, Institute of Anatomy and Morphology, Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov University), Moscow, Russian Federation

E-mail: shemy-akov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6272-3026>

Syusin, Ilya V. — PhD (Biology), Associate Professor at the Department of Biotechnology and Biochemistry, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

E-mail: ilya.sysin@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4993-6040>

Trofimov, Vladimir A. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor at the Department of Normal and Pathological Physiology, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

E-mail: geneticalab@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1294-1417>

Молоканова Софья Юрьевна — студент 4 курса ИКМ лечебного факультета, группы 1. 4. 58, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет), Москва, Российская Федерация
E-mail: z9851142986@gmail.com

Чаиркин Иван Николаевич — доктор медицинских наук, профессор, ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России (Пироговский Университет), Москва, Российская Федерация
E-mail: chairkin@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1235-9910>

Molokanova, Sofya Yu. — 4th-year Student, International School of Medicine, Faculty of General Medicine, Group 1.4.58, Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov University), Moscow, Russian Federation
E-mail: z9851142986@gmail.com

Chairkin, Ivan N. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Pirogov Russian National Research Medical University (Pirogov University), Moscow, Russian Federation
E-mail: chairkin@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1235-9910>

Поступила в редакцию 15.01.2026

После доработки 31.01.2026

Принята к публикации 06.02.2026

Received January 15, 2026

Revised January 31, 2026

Accepted February 06, 2026