

DOI: 10.7868/S3034574X26030081
УДК 579.66

Оригинальная статья

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМАССЫ КУКОЛОК ТУТОВОГО ШЕЛКОПРЯДА (*BOMBYX MORI*) ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРЕПАРАТОВ

А.О. Попова^{1,*}, Е.В. Кунтина², Е.Г. Евлагина³, Р.В. Уланова²

¹Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация

²Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация

³Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный
научный аграрный центр», Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация

*E-mail: sinelnikov11@ya.ru

Аннотация. Разработан новый эффективный подход к получению белковых препаратов из куколок шелкопряда — массового отхода производства шелка, основанный на использовании различных штаммов *Lactocaseibacillus* sp. и *Bacillus* sp. Отобран штамм, формирующий плотный сгусток белка из белкового экстракта куколок тутового шелкопряда, позволяющий провести микробное осаждение белка в более мягких и благоприятных условиях по сравнению с химическими методами. Белковые препараты, полученные разработанным способом, отличались повышенным содержанием незаменимых аминокислот по сравнению с белком мяса и эталонным белком. Проведенные исследования доказывают, что биомасса тутового шелкопряда является доброкачественным источником белка. Эти результаты могут послужить основой для развития новых технологий и способов производства пищевых белков из нетрадиционного сырья.

Ключевые слова: куколки шелкопряда, белковый экстракт, молочнокислые бактерии, спорообразующие бактерии, коагуляция и синерезис белка, состав аминокислот и жирных кислот

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания 122040800164–6 ФИЦ Биотехнологии РАН и Соглашения № 075-15-2025-485.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

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

Ссылка для цитирования: Попова А.О., Кунтина Е.В., Евлагина Е.Г., Уланова Р.В. Биотехнологический потенциал использования биомассы куколок тутового шелкопряда (*Bombyx mori*) для производства пищевых препаратов. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 3. С. 440–449. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26030081>

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF USING BIOMASS OF THE *BOMBYX MORI* PUPAE FOR FOOD PRODUCTION

A.O. Popova^{1,*}, E.V. Kuntina², E.G. Evlagina³, R.V. Ulanova²

¹*A.N. Bach Institute of Biochemistry, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology”
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology”
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

³*Federal State Budgetary Scientific Institution “North Caucasus Federal Scientific Agrarian Center”
Mikhaylovsk, Stavropol Krai, Russian Federation*

*E-mail: sinelnikov11@ya.ru

Abstract. A new, effective approach to obtaining protein preparations from silkworm pupae, a mass waste product of silkworm production, has been developed. It is based on the use of various strains of *Lacticaseibacillus* sp. and *Bacillus* sp. A strain was selected that forms a dense protein clot from the protein extract of silkworm pupae, enabling microbial protein precipitation under milder and more favorable conditions compared to chemical methods. Protein preparations obtained by the developed method were characterized by a higher content of essential amino acids compared to that in meat protein and a reference protein. The conducted studies demonstrate that silkworm biomass is a high-quality protein source. These results can serve as a basis for the development of new technologies and methods for producing food proteins from non-traditional raw materials.

Keywords: silkworm pupae, protein extract, lactic acid bacteria, spore-forming bacteria, protein coagulation and syneresis, amino acid and fatty acid composition

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment 122040800164-6 FRC Biotechnology RAS and Agreement No. 075-15-2025-485.

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

Authors contribution. All the authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article.

For Citation: Popova A.O., Kuntina E.V., Evlagina E.G., Ulanova R.V. Biotechnological potential of using biomass of the *Bombyx mori* pupae for food production. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(3): 440–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26030081>

ВВЕДЕНИЕ

В связи с глобальной проблемой дефицита пищевых ресурсов все большее значение приобретает поиск альтернативных источников белка, одним из которых являются насекомые и их личинки [1], в том числе, куколки шелкопряда — *Bombyx mori* [2]. Благодаря высокому содержанию белка (55–62 %), жирных кислот (16 %), минералов и витаминов куколки шелкопряда являются перспективным ресурсом питательных веществ или компонентом пищи в ряде регионов [2]. Наличие в составе куколок разнообразных биологически активных соединений с антимикробной, антиоксидантной, антираковой и гепатопротекторной активностями, что рассмотрено в обзоре [3], обуславливает их привлекательность как ценного сырья в фармакологической и косметической промышленности [4, 5]. Эффективная валоризация куколок — побочного продукта производства шелка, важна и для снижения риска загрязнения окружающей среды и развития микрофлоры [6], в том числе, патогенной, при их выбросах рядом с местами производства шелка. Несмотря на высокую пищевую ценность, куколки шелкопряда не нашли широкого применения в силу разных причин, обусловленных, главным образом, вкусовыми и эстетическими предпочтениями потребителей. Муку из цельных высушенных куколок тутового шелкопряда было рекомендовано использовать в составе кормов для сельскохозяйственных животных [7–10] или в качестве добавок при изготовлении хлебобулочной, молочной и мясной продукции [11].

В ряде исследований были описаны подходы к переработке этого сырья и получению очищенных фракций за счет удаления примесей и частичного обезжиривания и извлечения белков [12]. Однако до сих пор не уделялось достаточного внимания изучению возможности микробной трансформации куколок шелкопряда. Ранее в наших исследованиях был разработан подход к переработке нетрадиционного белкового сырья (личинки мух) с участием молочнокислых бактерий — лактобацилл; однако для отделения белковых компонентов требовались дополнительные стадии [13, 14].

Данная работа была направлена на разработку способа микробной переработки биомассы куколок шелкопряда, предусматривающего эффективную коагуляцию белка и уплотнение белковой фракции (синерезисом) с отделением сыворотки. Следует отметить, что изоляты бактерий родов *Lacticaseibacillus* и *Bacillus* или их смешанные культуры обладали различной способностью к синерезису, что показано в исследованиях получения творога [15].

Цель данной работы — выявление возможности получения белкового продукта из нового сырья — куколок шелкопряда *Bombyx mori* с использованием

разных штаммов бацилл и молочнокислых бактерий и его характеристика.

МЕТОДИКА

Куколки шелкопряда *Bombyx mori*, умерщвленные в кокономорильной камере горячим паром при 70–80 °С в течение 25–30 мин, были предоставлены Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр». Для получения обогащенного белком субстрата высушенную биомассу куколок измельчали в гомогенизаторе (Taurus Rowzer, Болгария), подвергали частичному обезжириванию прессованием нагретой в течение 1 ч массы куколок и экстракции 0,2%-ным раствором NaOH в соотношении 1 : 7 при постоянном перемешивании (30 мин, 90 °С); pH экстракта 9,0–9,5. Отфильтрованный экстракт с общим содержанием белка 7 %, определенным по методу Лоури, автоклавировали при 1 атм 30 мин и использовали в качестве исходного субстрата для культивирования бактерий.

Для микробной трансформации субстрата использовали штаммы *Lacticaseibacillus* sp. UQM 41618, UQM 41619, UQM 41620, близкие к *L. rhamnosus* а также *Bacillus cereus* UQM 40988^T (=ATCC 14579^T = DSM 31^T = NCIMB 9373^T) и *Bacillus subtilis* UQM 41285 из ЦКП «Коллекция уникальных и экстремофильных микроорганизмов различных физиологических групп биотехнологического назначения (UNIQEM, ФИЦ Биотехнологии РАН). Штаммы лактобацилл, задепонированные ранее в коллекцию UNIQEM, обладают толерантностью к повышенным значениям pH среды (9,0–9,5) и способностью метаболизировать новые субстраты [16]. Выделенный и охарактеризованный в настоящей работе штамм *Bacillus* sp. депонирован в коллекцию UNIQEM под регистрационным номером UQM 41811.

Морфологию и особенности строения клеток изучали при просмотрах препаратов под микроскопом Axioplan (Carl Zeiss, Германия), а также ультратонких срезов в просвечивающем электронном микроскопе JEM-1400 (Jeol, Япония) с использованием оборудования ЦКП «Коллекция UNIQEM» (ФИЦ Биотехнологии РАН, Россия). Срезы клеток получали согласно [17].

Идентификацию бактерий до родового уровня осуществляли по результатам анализа нуклеотидной последовательности фрагментов гена 16S рРНК в соответствии с ранее описанными методиками [16] на базе ЦКП «Биоинженерия» ФИЦ Биотехнологии РАН.

Штаммы лактобацилл поддерживали на агаризованной питательной среде MRS (Merck KGaA, Германия) с pH 5,7, а бацилл — на плотной (с 1,8 % агара) среде на основе двукратно разбавленного

LB-бульона (Sigma-Aldrich, США). Для приготовления инокулята штаммы высевали на богатую питательную среду — обезжиренный молочный агар — с высоким содержанием белка и углеводов (3,3 % и 4,7 %) для задержки или репрессии спорообразования у бацилл и инкубировали в течение 22 ч при 37 °С.

Смывы с выросших газонов вносили в белковый экстракт (рН 9,0–9,5) в объемном соотношении 5 % до достижения начального титра клеток $3,0 \times 10^3$ кл/мл; суспензии инкубировали в статических условиях (без перемешивания) при 37 °С в течение 8 часов до образования визуально различимого сгустка. Сыворотку отделяли декантированием, сгусток промывали дистиллированной водой, прогревали при 90 °С в течение 10 мин для удаления микрофлоры, охлаждали и лиофилизировали на установке FreeZone (Labconco, США). Эффективность микробной переработки белкового субстрата оценивали по результатам трех и более серий экспериментов.

Аминокислотный состав образцов лиофильно высушенного сгустка определяли с использованием жидкостного хроматографа фирмы Hitachi (Япония) на базе НИИ Физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ с использованием стандартного режима анализа белковых

гидролизатов. Липиды из образцов экстрагировали смесью хлороформ: солянокислый метанол (2 : 1) по методу Фолча. Состав жирных кислот липидов анализировали на хроматографе с масс-детектором Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония) в ЦКП «Промышленные биотехнологии» ФИЦ Биотехнологии РАН.

Содержание микроорганизмов (КОЕ/г) в образцах белкового сгустка определяли по результатам посевов суспензий на плотные среды: КМАФАнМ (НПЦ «Биокомпас-С», Россия) для мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов; среду Эйкмана (Оболенск, Россия) для *E.coli* и колиформных бактерий; среду Эндо (Оболенск, Россия) для энтеробактерий и агаризованное сусло (2,8 Балл) для учета микромицетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный способ микробной трансформации измельченных и высушенных куколок шелкопряда (рис. 1) предусматривал частичное удаление липидов и полное — нерастворимых компонентов (в том числе, хитина). Для обезжиривания был выбран и применен отжим массы куколок с удалением масляной фракции без использования растворителей с учетом ранее показанной равноценности белковых продуктов, полученных при пробоподготовке схожего сырья (личинок мух) [18].

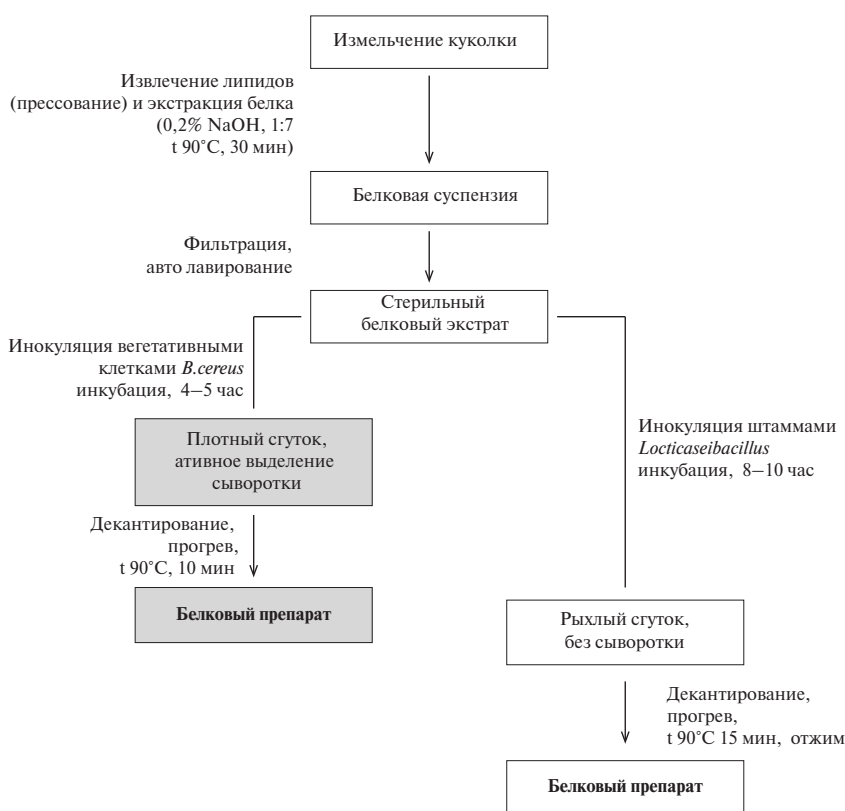


Рис. 1. Схема получения белкового препарата из биомассы куколок *Bombyx mori* с использованием штаммов *Bacillus* sp. UQM 41811 и *Lacticaseibacillus* sp. UQM 41620

Fig. 1. Scheme for obtaining a protein preparation from the biomass of *Bombyx mori* pupae using strains *Bacillus* sp. UQM 41811 and *Lacticaseibacillus* sp. UQM 41620

Содержание белка в экстрактах, полученных путем инкубации (30 мин; перемешивание; 80 °С) обезжиренных куколок в присутствии 0,2 % NaOH (1 : 7 в/об) и фильтрации, составили 7,0 % по результатам определений методом Лоури. В связи с высокой обсемененностью белкового экстракта микроорганизмами в процесс пробоподготовки субстрата была включена стадия термической обработки при 1 атм 30 мин, обуславливающая его стерилизацию.

Степень трансформации белкового субстрата зависела от штамма бактерий, а ее продолжительность — от качества инокулята. Все исследованные штаммы молочнокислых бактерий и спорообразующих бацилл (*Lactocaseibacillus* sp. UQM 41618, UQM 41619, UQM 41620; *Bacillus cereus* UQM 40988^T; *Bacillus subtilis* UQM 41285 и изолят *Bacillus* sp. UQM 4181) коагулировали белок экстракта. Однако способность к активному синерезису проявили только представители рода *Bacillus* (рис. 1), а среди них наиболее активным был штамм UQM 41811, выделенный из шрота подсолнечника. По результатам молекулярно-генетической идентификации по анализу последовательностей гена 16S рРНК, штамм UQM 41811 был отнесен к роду *Bacillus*, а наиболее близкими (со сходством 99,9 % — 100 %) оказались несколько видов: *B. cereus*, *B. proteolyticus* и *B. albus*. Однако видовая идентификация применительно к спорообразующим бациллам по этому гену ненадежна [19, 20], и для установления принадлежности к конкретному виду требуются обширные исследования. Выделенный и исследованный в работе штамм *Bacillus* sp. UQM 41811 был способен к росту в среде с экстрактом из куколок шелкопряда со значением рН среды (9,0 — 9,5), выше верхнего предела диапазона роста многих штаммов *B. cereus*.

Существенной для обеспечения эффективной трансформации куколок шелкопряда (рис. 1) была стадия подготовки культур молочнокислых бактерий и спорообразующих бацилл, предусматривающая двух- или трехкратный пассаж штаммов на богатой плотной среде — молочном агаре (с содержанием белка и углеводов 3,3 % и 4,7 %, соответственно), и использование в качестве инокулята смывов выросших культур.

По результатам электронно-микроскопических исследований ультратонких срезов в смывых суспензиях штаммов *Lactocaseibacillus* sp. или *Bacillus* sp. было выявлено преобладание интактных клеток, в том числе, делящихся, с капсульным слоем (в виде выростов), сплошной клеточной стенкой грамположительного типа и электронно-плотной цитоплазмой с равномерной текстурой (рис. 2). На ультратонких срезах клеток *Lactocaseibacillus* sp. было выявлено наличие множественных мезосо-подобных образований внутри цитоплазмы (рис. 2А), которые рассматривают либо как арте-

факт за счет применения фиксации при подготовке материала для ТЭМ, либо как реальные структуры, обладающие различными биохимическими функциями [21]. В суспензиях *Bacillus* sp., смывых с молочного агара, большинство клеток было представлено делящимися и поделившимися клетками без признаков спорообразования (асимметричного деления, закладки споры); особенностью их строения было наличие электронно-прозрачных включений (рис. 2 б), характерных для полигидроксibuтирата [17].

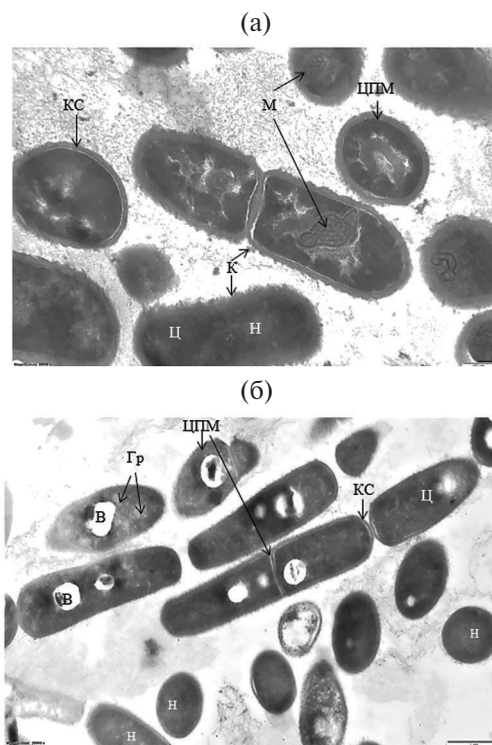


Рис. 2. Микрофотографии срезов клеток (а) *Lactocaseibacillus* sp. UQM 41620 и (б) *Bacillus* sp. UQM 41811 в культурах (8–10 ч), смывых с молочного агара и использованных в качестве инокулята для переработки белкового экстракта из куколок шелкопряда.

Обозначения: К — капсульный слой; КС — клеточная стенка; ЦПМ — цитоплазматическая мембрана; Ц — цитоплазма; М — мезомоподобные структуры; В — включения; Ц — цитоплазма; ГР — мелкозернистые гранулы; Н — нуклеоид. Масштабные метки: (А) 200 нм; (Б) 1 мкм

Fig. 2. Micrographs of cell sections of (a) *Lactocaseibacillus* sp. UQM 41620 and (b) *Bacillus* sp. UQM 41811 in cultures (8–10 h) washed from milk agar and used as inoculum for processing protein extract obtained from silkworm pupae. К — capsular layer; CL — cell wall; CPM — cytoplasmic membrane; C — cytoplasm; M — mesome-like structures; B — inclusions; C — cytoplasm; GR — fine-grained granules; H — nucleoid. Scale bars: (a) 200 nm; (b) 1 μm

Использование метаболически активных культур бактерий, по-видимому, обусловило быструю коагуляцию белка в вариантах инокуляции

молочнокислыми бактериями или коагуляцию с последующим синерезисом при использовании вегетативных клеток бацилл (рис. 1). Развитие инокулированных культур *Bacillus* sp. UQM 41811 в новой среде — богатом по белку экстракте (7 %) из куколок шелкопряда — в течение 4–5 ч не сопровождалось массовым образованием спор. В отделен-

ном стустке общее содержание микроорганизмов после его прогревания при 90 °С в течение 10 мин, промывки и сушки не превышало 2×10^2 КОЕ/г (табл. 1); в случае обилия термоустойчивых спор в полученном белковом продукте показатель общей обсемененности бактериями мог оказаться выше.

Таблица 1. Органолептические, физико-химические и микробиологические, показатели белкового препарата, полученного из биомассы куколок *Bombyx mori* с использованием штамма *Bacillus* sp. UQM 41811

Table 1. Organoleptic, physicochemical and microbiological characteristics of a protein preparation obtained from the biomass of *B. mori* pupae using the *Bacillus* sp. strain UQM 41811

Показатели	Характеристика
Органолептические	
Внешний вид	Однородный рассыпчатый порошок, без комков
Запах	Без посторонних запахов
Вкус	Без посторонних привкусов
Цвет	Светло-кремовый или кремовый
Физико-химические	
Белок, %	80,0–85,0
Влага, %	8,0–9,0
Липиды, %	7,0–9,0
Посторонние примеси	Отсутствуют
Микробиологические	
Мезофильные аэробные и факультативно анаэробные микроорганизмы, КОЕ/г	2×10^2
Бактерии группы кишечной палочки, в 0,01 г	Не обнаружены
Энтеробактерии (в т.ч. <i>Salmonella</i>), в 25 г	Не обнаружены
Микромицеты, КОЕ/г	20

Использование разных штаммов бацилл, в том числе, с точно установленной видовой принадлежностью (*Bacillus cereus*, *B. subtilis*), обеспечило более экономичную переработку экстракта из куколок шелкопряда, что выражалось в отсутствии необходимости стадии отжима, чем в вариантах применения молочнокислых бактерий (рис. 1). Однако предпочтительность выбора между непорообразующими молочнокислыми бактериями и спорообразующими бациллами для масштабирования этого процесса неочевидна. Несмотря на долгую историю применения бактерий рода *Bacillus* в пищевой биотехнологии [22], существуют и определенные опасения, связанные с возможностью проявления этими микроорганизмами патогенных свойств [23].

Отсутствие покоящихся и устойчивых форм (спор) важно для пищевых продуктов, что рассмотрено в обзоре [24]. В нашем исследовании переработки куколок шелкопряда с участием бактерий рода *Bacillus* использование богатого по

белку и углеводам субстрата способствовало активному росту и метаболизму клеток, но не созданию стресса голодания. Истощение питательного субстрата(ов), т. е. голодание, является одним из триггеров для перехода в стационарную фазу развития и запуска экспрессии генетических программ, направленных на обеспечение устойчивости и выживания [25]. Генетические механизмы контроля спорообразования изучены, в основном, для *Bacillus subtilis* и включают сложную систему действия различных регуляторов транскрипции (сигма-факторов, SpoOA и др.), что рассмотрено в обзоре [26]. Высокое содержание источников углерода в среде обуславливает катаболитную репрессию спорообразования, которая опосредуется подкислением среды и регулируется транскрипционным фактором AbrB [27], хотя это не единственный регуляторный механизм [28]. Согласно результатам предсказательного моделирования, вариации pH среды являются одним из важных факторов, влияющих на

яющим как на образование, так и на прорастание спор бацилл [29].

Следует подчеркнуть, что эндоспоры обеспечивают длительное выживание и устойчивость к различным повреждающим воздействиям (особенно, к термообработке), в отличие от вегетативных клеток. Поэтому предложенная в данной работе схема подготовки, качество инокулята, подбор сред и краткосрочность процесса переработки субстрата, направленные на минимизацию спорообразования, может быть выигрышной для предотвращения нахождения в конечном продукте бактерий р. *Bacillus*. В таком режиме процесса термоустойчивые споры не образовались из-за краткосрочности процесса микробной коагуляции белка (4–5 ч) и/

или репрессии спорообразования, а большая часть вегетативных клетки бацилл погибала при прогревании конечного продукта — белкового сгустка при 90 °С в течение 10 мин.

Белковый продукт, образовавшийся в результате синерезиса после инкубации сырья из куколок шелкопряда с активно растущими культурами штамма бацилл UQM 41811, обладал рядом преимуществ по сравнению с белком говядины и эталонным белком согласно шкале ФАО/ВОЗ. Полученный нами продукт характеризовался повышенным содержанием ряда незаменимых аминокислот, особенно валина, тирозина и лизина в составе общего белка, (табл. 2), за исключением метионина.

Таблица 2. Аминокислотный состав белка и жирнокислотный состав липидов белкового препарата, полученного из биомассы куколок тутового шелкопряда с использованием штамма *Bacillus* sp. UQM 41811

Table 2. Amino acid composition of protein and fatty acid composition of lipids in the protein preparation obtained from the biomass of silkworm pupae with using *Bacillus* sp. UQM 41811

Аминокислоты	Препарат из куколок тутового шелкопряда	Говядина	Шкала ФАО/ВОЗ
	% к сумме аминокислот		
Asp	13,3	8,80	
Thr*	4,5	4,45	3,4
Ser	4,3	4,40	
Glu	12,3	17,27	
Pro	<u>3,6</u>	3,91	
Gly	4,0	4,65	
Ala	5,1	5,1	
Cys	0,3	2,05	
Val*	6,7	4,09	3,5
Met*	2,7	2,37	2,5
Ile*	5,1	2,98	2,8
Leu*	8,4	6,41	6,6
Tyr*	7,1	3,99	1,1
Phe*	5,6	4,17	6,3
Orn	0,1	0	0
Lys*	8,2	7,03	5,8
His	2,3	5,27	
Arg	6,4	6,75	
Сумма НАК	48,3	35,49	32,0

*Незаменимые аминокислоты

*Незаменимые аминокислоты

Еще одним ценным свойством было высокое (68,32%) содержание ненасыщенных ННЖК, полиненасыщенных незаменимых ПНЖК — линолевой (октадекадиеновая) и линоленовой (октадекатриеновая) ЖК, которое составляло 37,73 % и 20,68 % соответственно (Рис. 3). По органолептическим,

физико-химическим и микробиологическим показателям, в том числе отсутствию обсемененности патогенными микроорганизмами (табл. 1), полученный белковый продукт соответствовал требованиям к пищевым продуктам и показателям безопасности.

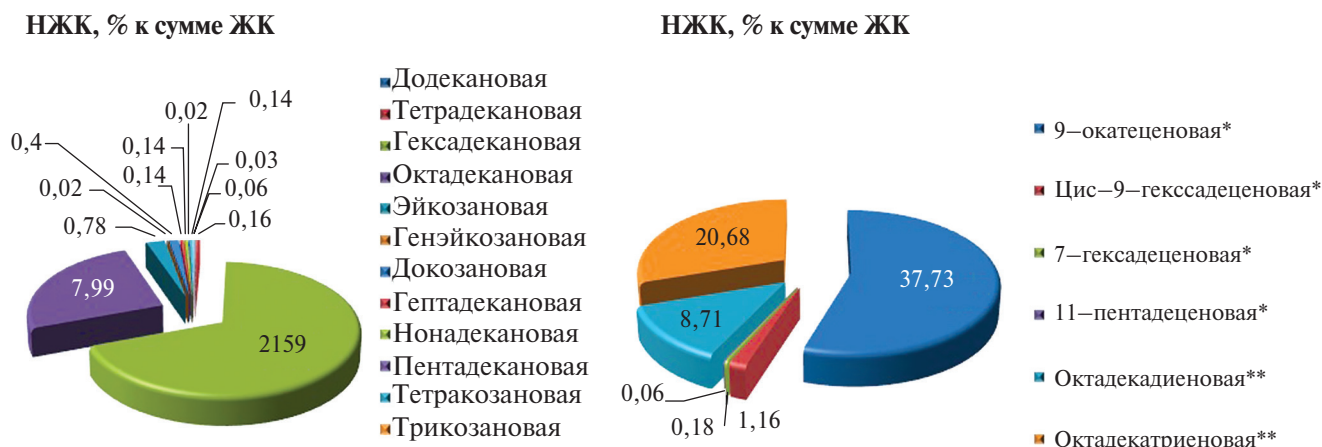


Рис. 3. Доля насыщенных и ненасыщенных жирных кислот от суммы всех жирных кислот в белковом препарате из куколок тутового шелкопряда, полученного с использованием штамма *Bacillus* sp. UQM 41811
Fig. 3. The proportion of saturated and unsaturated fatty acids from the sum of all fatty acids in the protein preparation from silkworm pupae, obtained using the *Bacillus* sp. strain UQM 41811

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые разработана и экспериментально доказана технологическая схема получения препаратов белка на основе биомассы куколок с использованием культур спорообразующих бацилл, показана биологическая ценность белкового препарата, полученного с использованием в технологическом процессе микроорганизмов, установлена возможность применения куколок шелкопряда в качестве источника получения белковых препаратов. До наших исследований микробной трансформации куколок шелкопряда, являющихся массовым отходом шелковичного

производства, использовали лишь в качестве субстрата для широкомасштабного культивирования бактерий *Bacillus thuringiensis* — потенциального биопестицида [30].

Описанный способ представляется перспективным для получения препаратов для валоризации иных субстратов, например, биомассы личинок разных насекомых и малоценных растительных отходов и позволяет создать новые и привлекательные пищевые препараты и продукты с разнообразными функциональными свойствами. Для успешного внедрения разработанных технологических решений в реальный сектор экономики необходимы дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Liceaga A.M., Aguilar-Toalá J.E., Vallejo-Cordoba B., González-Córdova A.F., Hernández-Mendoza A. *Annu. Rev. Food. Sci. Technol.*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 19–34. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-052720-112443>
- Sheikh I.U., Banday M.T., Baba I.A., Adil S., Nissa S.S., Zaffer B., et al. *J. Entomol. Zool. Studies*. 2018, vol. 6, no. 4, pp. 1010–1016.
- Sadat A., Biswas T., Cardoso M., Mondal R., Ghosh A., Dam P., et al. *Curr. Opin. Food Sci.*, 2022, vol. 44, article 100818. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100818>
- Zhou Y., Zhou S., Duan H., Wang J., Yan W. *Foods*. 2022, vol. 11, no. 11, pp. 1594. <https://doi.org/10.3390/foods11111594>
- Susirirut P., Thitipramote N., Chaiwut P. *Molecules*. 2023, vol. 28, no. 20, pp. 7032. <https://doi.org/10.3390/molecules28207032>
- Wang J., Wu F., Liang Y., Wang M., Afr. *J. Biotechnol.* 2010. vol. 9 no. 20, pp. 2956–2964, <https://doi.org/10.5897/AJB2010.000-3130>
- Ullah R., Khan. S., Khan R., Ullah Q. *Res. Vet. Sci.* 2020. vol. 132. no. pp. 574–577. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2020.03.009>
- Areerat S., Chundang P., Lekcharoensuk C., Kovitvadhia. *Animals*. 2021. vol. 11. no. 9. Pp. 2680. <https://doi.org/10.3390/ani11092680>
- Fatilloev Sh.F., Makhmudov R.A. *Universum: technical sciences*. 2024. vol. 6. no. 10. pp. 65–69. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.127.10.18330>

10. Park Y.S., Choi Y.S., Hwang K.E., Kim T.K., Lee C.W., Shin D.M., Han S.G. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 2017. vol. 37. no. 3. pp. 351–359. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.3.351>
11. Castro-López C., Santiago-López L., Vallejo-Cordoba B., González-Córdova A.F., Liceaga A.M., García H.S., Hernández-Mendoza A., *Food Res. Int.* 2020. vol. 137. no. 109750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109750>
12. Yi L., Lakemond C.M., Sagis L.M., Eisner-Schadler V., van Huis A., van Boekel M.A. *Food Chem.* 2013. vol. 141. no. 4. pp. 3341–3348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.115>
13. Ulanova R.V., Kravchenko I.K. Method for obtaining protein, *Russian Federation Patent* no. 2557407.2015.
14. Ulanova R.V. *Feed production.* 2013. no. 5. pp. 33–34. <https://doi.org/EDN PZUHMZ>
15. Adak A., Parua S., Maity C., Ghosh K., Halder S.K., Das Mohapatra P.K., Mondal K.C. *Indian J. Exp. Biol.* 2013. vol. 51. no. 11. pp. 910–918. PMID: 24416925
16. Sinelnikov A.V., Kolganova T.V., Ulanova R.V. *Appl. Biochem. Microbiol.* 2024. vol. 60. no. 3. P. 476–482. <https://doi.org/10.1134/S0003683824603664>
17. Mulyukin A.L., Lusta K.A., Gryaznova M.N., Kozlova A.N., Duzha M.V., Duda V.I., El-Registan G.I. *Microbiology.* 1996. vol. 65. no. 6. pp. 782–789. PMID: 9132531
18. Ulanova R., Kravchenko I., *Entomol. Appl. Sci. Lett.* 2016. vol. 3. no. 5. pp. 182–188. ISSN 2072-9669
19. Maughan H., Van der Auwera G. *Infect. Genet. Evol.* 2011. vol.11. no. 5. pp. 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2011.02.001>
20. Xu X., Nielsen L.J.D., Song L., Maróti G., Strube M.L., Kovács Á. T., *ISME COMMUN.* 2023. vol. 3. no. 126. <https://doi.org/10.1038/s43705-023-00330-9>
21. Li X., Yang L.P., Zhu W.X., Pang X.Y., Feng H.Q., *Adv. Mater. Res.* 2014. vol. 894. pp. 316–320. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.894.316>
22. Li Z., Zheng M., Zheng J., Gänzle M.G. *Curr. Opin. Food Sci.* 2023. vol. 50. pp. 101007. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101007>
23. Elshagabee F.M.F., Rokana N., Gulhane R.D., Sharma C., Panwar H. *Front. Microbiol.* 2017. vol. 10. no. 8. pp.1490. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01490>
24. Farag M.A., Mesak M.A., Saied D.B., Ezzelarab N.M., *Trends in Food Sci. Technol.* 2021. vol. 107. pp. 252–267. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.037>
25. Jaishankar J., Srivastava P., *Front Microbiol.* 2017. vol. 16. no. 8: 2000. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02000>
26. Gauvry E., Mathot A.G., Leguérinel I., Couvert O., Postollec O.F., Broussolle V., Coroller L. *Res. Microbiol.* 2017. vol. 168. no. 4. pp. 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2016.10.006>
27. Cosby W.M., Zuber P.J. *Bacteriol.* vol. 179. no. 21. pp. 6778–6787. <https://journals.asm.org/doi/10.1128/jb.179.21.6778-6787.1997>
28. Shafikhani S., Partovi A., Leighton T. *Curr. Microbiol.* 2003. vol.47. pp. 300–308. <https://doi.org/10.1007/s00284-002-4012-2>
29. Hafdane K., Desriac N., Trunet C., Le Marc Y., Mathot AG, Coroller L. *Appl. Env. Microbiol.* 2025. vol. 91. no. 10. pp. 01–25. <https://doi.org/10.1128/aem.01101-25>
30. Patil S.R., Amena S., Vikas A., Rahul P., Jagadeesh K., Praveen K. *Bioresour. Technol.* 2013. vol. 131. pp. 545–547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.153>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Попова Анна Олеговна — главный специалист по интеллектуальной собственности, преподаватель-исследователь, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: sinelnikov11@ya.ru

Кунтина Екатерина Владимировна — ведущий инженер, Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: kuntina.ekaterina@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Popova, Anna O. — Chief Specialist on Intellectual Property, Teacher-Researcher, Federal Research Center "Fundamental Bases of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: sinelnikov11@ya.ru

Kuntina, Ekaterina V. — Leading Engineer, S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center "Fundamental Bases of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: kuntina.ekaterina@yandex.ru

Евлагина Елена Григорьевна — младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация
E-mail: gnu_rnis_silk@mail.ru

Уланова Рузалия Владимировна — научный сотрудник, кандидат биологических наук, Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: solodovnicova@rambler.ru

Evlagina, Elena G. — Junior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution "North-Caucasus Federal Scientific Agrarian Center", Mikhailovsk, Stavropol Territory, Russian Federation
E-mail: gnu_rnis_silk@mail.ru

Ulanova, Ruzalia V. — a research associate, Candidate of Biological Sciences, S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center "Fundamental Principles of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
E-mail: solodovnicova@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.11.2025
После доработки 22.01.2026
Принята к публикации 06.02.2026

Received November 22, 2025
Revised January 22, 2026
Accepted February 06, 2026