Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-96-104 Обзорная статья/Review article
УДК 606:66.098:621.798-035 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Биоконверсия растительных отходов в биополимеры и прекурсоры биоразлагаемых упаковочных материалов

Марал Бердимуратова [1] maral.berdimuratova@mail.ru 0000-0002-4894-8621
Ирина А. Кирш [1] kirshia@mgupp.ru 0000-0003-3370-4226

1 Российский биотехнологический университет, Волоколамское ш., 11, г. Москва, 125080, Россия

Аннотация. Рациональное управление твёрдыми отходами и их повторное использование в качестве сырья для получения ценных продуктов являются важными условиями снижения экологической нагрузки, при этом биоконверсия органической биомассы рассматривается как более экологичная альтернатива энергоёмким термическим методам переработки — газификации, пиролизу и сжиганию. В статье рассмотрены возможности биоконверсии растительных и агропромышленных органических отходов в ценные биопродукты, применимые при создании биоразлагаемых упаковочных материалов. Поиск и отбор литературных источников проводили с учётом рекомендаций PRISMA 2020 по ключевым словам на русском и английском языках с последующим удалением дублирующих и нерелевантных публикаций и полнотекстовым просмотром работ. Обобщены основные микробиологические и ферментативные методы переработки биомассы — ферментация, ферментативный гидролиз и солюбилизация, — а также факторы, влияющие на эффективность процесса: состав субстрата, выбор штамма-продуцента, тип ферментации и физико-химические условия культивирования, включая температуру, pH, аэрацию, перемешивание и объём инокулята. Рассмотрены особенности твердофазной и глубинной ферментации в периодическом, непрерывном режимах и в режиме с подпиткой. Особое внимание уделено использованию кожуры фруктов и овощей, шелухи, опилок, отрубей, жома и других растительных остатков как доступного сырья для получения органических кислот, ферментов, бактериальной целлюлозы, полигидроксиалканоатов, γ-полиглутаминовой кислоты и других биополимеров. Приведены примеры получения молочной кислоты из овсяной лузги, мискантуса и пивной дробины, γ-полиглутаминовой кислоты из гидролизата опилок тополя с выходом 30,87 ± 0,44 г/л, бактериальной целлюлозы из овсяной шелухи. Показано, что продукты биоконверсии могут выполнять различные функции в составе биоразлагаемых плёнок, покрытий и композитных упаковочных материалов, что способствует снижению экологической нагрузки и развитию ресурсосберегающих технологий.

Ключевые слова: биоконверсия, растительные отходы, ферментация, биопродукты, органические кислоты, биоферменты, бактериальная целлюлоза, биополимеры, биоразлагаемая упаковка.

Bioconversion of plant waste into biopolymers and precursors of biodegradable packaging materials

Maral Berdimuratova [1] maral.berdimuratova@mail.ru 0000-0002-4894-8621
Irina A. Kirsh [1] kirshia@mgupp.ru 0000-0003-3370-4226

1 Russian Biotechnological University, Volokolamskoe h., 11, Moscow, 125080, Russia

Abstract. Rational management of solid waste and its reuse as raw materials for the production of valuable products are important for reducing environmental impacts. Bioconversion of organic biomass is considered a more environmentally friendly alternative to energy-intensive thermal processing methods such as gasification, pyrolysis, and incineration. This article examines the potential for bioconversion of plant and agro-industrial organic waste into valuable bioproducts applicable in the creation of biodegradable packaging materials. A literature search and selection were conducted in accordance with PRISMA 2020 recommendations using keywords in Russian and English. Duplicate and irrelevant publications were removed, and a full-text review was performed. The article summarizes the main microbiological and enzymatic methods for biomass processing—fermentation, enzymatic hydrolysis, and solubilization—as well as factors influencing process efficiency: substrate composition, choice of producer strain, fermentation type, and physicochemical cultivation conditions, including temperature, pH, aeration, mixing, and inoculum volume. The article examines the specific features of solid-phase and submerged fermentation in batch, continuous, and fed-batch modes. Particular attention is paid to the use of fruit and vegetable peels, husks, sawdust, bran, bagasse, and other plant residues as readily available raw materials for producing organic acids, enzymes, bacterial cellulose, polyhydroxyalkanoates, γ-polyglutamic acid, and other biopolymers. Examples of producing lactic acid from oat husks, miscanthus, and brewer's grains, γ-polyglutamic acid from poplar sawdust hydrolysate with a yield of 30.87 ± 0.44 g/L, and bacterial cellulose from oat husks are presented. It is demonstrated that bioconversion products can perform various functions in biodegradable films, coatings, and composite packaging materials, thereby reducing environmental impacts and advancing resource-saving technologies.

Keywords: bioconversion, plant waste, fermentation, bioproducts, organic acids, bioenzymes, bacterial cellulose, biopolymers, biodegradable packaging.

Введение

Рациональное управление твердыми отходами и их повторное использование в качестве сырья для получения ценных продуктов являются важными условиями снижения экологической нагрузки. В этом контексте биоконверсия органической биомассы рассматривается как более экологичная альтернатива энергоемким термическим методам переработки, таким как газификация, пиролиз и сжигание [1–3].

Цель работы – обобщить современные данные о биоконверсии растительных и агропромышленных отходов в биопродукты, пригодные для использования при создании биоразлагаемых упаковочных материалов.

Для цитирования
Бердимуратова М., Кирш И.А. Биоконверсия растительных отходов в биополимеры и прекурсоры биоразлагаемых упаковочных материалов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 96–104. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-96-104

For citation
Berdimuratova M., Kirsh I.A. Bioconversion of plant waste into biopolymers and precursors of biodegradable packaging materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 96–104. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-96-104

© 2026, Бердимуратова М., Кирш И.А.. / Berdimuratova M., Kirsh I.A.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Методология обзора

Поиск и отбор литературных источников проводили с учетом рекомендаций PRISMA 2020, используемых для повышения прозрачности подготовки обзорных публикаций.

Критериями включения являлись соответствие теме обзора, наличие сведений о виде растительного или агропромышленного сырья, методах предварительной обработки и биоконверсии, условиях ферментации, получаемых биопродуктах, свойствах биополимеров либо их возможном применении в составе биоразлагаемых пленок, покрытий и упаковочных материалов.

Отбор источников проводили последовательно: первичный поиск по ключевым словам, удаление дублирующих и нерелевантных публикаций, анализ названий и аннотаций, полнотекстовый просмотр работ, после чего в обзор включали источники, наиболее полно отражающие современные подходы к получению органических кислот, ферментов, бактериальной целлюлозы, γ-полиглутаминовой кислоты, полигидроксиалканоатов и других биополимеров из растительного вторичного сырья.

Биоконверсия растительных и органических отходов: сырье и основные процессы

Под биоконверсией понимают совокупность биологических процессов, основанных на метаболической активности микроорганизмов и других организмов, обеспечивающих превращение органических отходов в ценные биопродукты, включая биополимеры, биопластики, ферменты и другие соединения биотехнологического назначения [4–7]. Превращение твердых органических отходов в продукты с добавленной стоимостью происходит преимущественно путём ферментации, ферментативного гидролиза и солюбилизации [8, 9].

По сравнению с термическими методами биоконверсия требует меньших энергетических затрат, однако характеризуется большей продолжительностью процесса и необходимостью строгого контроля условий культивирования [10, 11]. Промышленные органические отходы образуются на различных этапах производства и переработки сырья – при резке, термической обработке, транспортировке и упаковке, – а также вследствие микробиологических и биохимических изменений [1, 12].

Такие отходы содержат значительное количество органических веществ и могут использоваться не только для компостирования или анаэробной переработки, но и как доступные субстраты для получения биотоплива, органических кислот, ферментов и других ценных биопродуктов [4, 13–15]. Для заявленной темы наибольший интерес представляют кожура фруктов и овощей, шелуха, опилки, отруби, жом, лузга и другие растительные остатки, содержащие доступные углеводные и лигноцеллюлозные компоненты.

Ферментация как основной метод биоконверсии

Ферментация — контролируемый биотехнологический процесс превращения органических веществ с участием микроорганизмов – бактерий, дрожжей и грибов, при котором твердые органические отходы используются как субстрат для роста клеток и синтеза ценных метаболитов [9, 14]. Эффективность получения биопродуктов зависит от типа ферментации, используемого штамма, состава субстрата и поддержания оптимальных физико-химических параметров процесса, включая температуру, pH, аэрацию, перемешивание и объем инокулята [16, 17].

В зависимости от условий проведения ферментация может быть глубинной (жидкофазной) и твердофазной, а по способу организации процесса – периодической, непрерывной или периодической с подпиткой. При глубинной ферментации микроорганизмы культивируются в питательной жидкой среде, что повышает однородность культуральной жидкости и упрощает выделение продукта [16]. Твердофазная ферментация протекает на субстрате с низким содержанием влаги. Она обеспечивает высокий выход целевого продукта при менее сложной последующей обработке и в меньшей степени подвержена микробному загрязнению [18].

Биопродукты биоконверсии, перспективные для упаковочных материалов

Органические кислоты и молочная кислота

Органические кислоты относятся к классу биологически активных соединений и образуются в живых организмах в процессе микробной ферментации или могут быть получены химическим синтезом [4]. Они применяются в фармацевтической, кормовой, пищевой, косметической и мыловаренной промышленности [7]. К органическим кислотам, получаемым в процессе биоконверсии, относятся молочная, лимонная, глюконовая, янтарная и фумаровая кислоты, синтез которых зависит от состава субстрата, используемого штамма микроорганизмов, типа ферментации и физико-химических параметров процесса [19, 20].

Молочная кислота представляет особый интерес для упаковочной отрасли, поскольку является предшественником биоразлагаемых полиэфиров, прежде всего полилактида. Её получают химическим синтезом или микробной ферментацией крахмала, сахаров и лигноцеллюлозной биомассы; при этом микробный способ считается более предпочтительным благодаря меньшим энергозатратам, безопасности процесса и высокой оптической чистоте продукта [21]. Основными продуцентами молочной кислоты являются микроорганизмы родов *Rhizopus* и *Lactobacillus*, а эффективность ферментации зависит от температуры, pH, состава питательной среды, штамма, аэрации, вида биомассы и типа процесса [21, 22].

В качестве доступного сырья для микробного получения молочной кислоты могут использоваться различные агропромышленные отходы, включая рисовую солому, пшеничные отруби, чайные отходы, жом маниоки и сахарный жом [23]. Шавыркина и Скиба предложили способ получения молочной кислоты – предшественника полилактида – из овсяной лузги: после двухстадийной химической обработки сырья получали техническую целлюлозу, подвергали её ферментативному гидролизу, а образующийся гидролизат ферментировали с использованием *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. Поддержание pH на уровне 6,5 в течение всего процесса повышало выход молочной кислоты в 1,7 раза по сравнению с процессом без корректировки кислотности среды [24].

Перспективным сырьем для получения молочной кислоты также является мискантус – целлюлозосодержащее растение, ферментативный гидролизат которого может использоваться как субстрат для молочнокислого брожения. Получение молочной кислоты из лигноцеллюлозного сырья обычно включает предварительную химическую обработку биомассы, ферментативное осахаривание и последующее сбраживание гидролизата микроорганизмами, преимущественно бактериями рода *Lactobacillus*. При ферментации гидролизата пивной дробины штаммом *Lactobacillus delbrueckii* показано, что добавление дрожжевого экстракта и компонентов питательной среды MRS повышает продуктивность процесса, однако наибольшее значение имеет контроль pH [25].

γ-полиглутаминовая кислота

γ-полиглутаминовая кислота (γ-ПГК) представляет собой природный водорастворимый, биоразлагаемый и многофункциональный биополимер микробного происхождения, который может синтезироваться бактериями рода Bacillus и применяться в пищевой, биомедицинской, экологической и косметической промышленности [26]. Благодаря пленкообразующей способности, волокнообразованию, кислородобарьерным свойствам, пластичности, адгезии, влагоудержанию и биоразлагаемости γ-ПГК рассматривается как представляющий интерес материал для биополимерных композиций [26, 27].

В одном из исследований опилки тополя были использованы в качестве субстрата для получения γ-ПГК: после кислотной обработки сырье подвергали ферментативному гидролизу, а полученный гидролизат применяли как питательную среду для синтеза биополимера. При использовании ферментативного гидролизата выход γ-ПГК составил 30,87 ± 0,44 г/л, что на 5,11 % превышало результат, полученный на среде с глюкозой [28]. Это позволило снизить количество добавляемой глюкозы и обеспечить более полную утилизацию сахаров, содержащихся в гидролизате опилок.

γ-ПГК может быть получена химическим синтезом, однако микробный способ считается более предпочтительным благодаря лучшим функциональным свойствам образующегося биополимера. Несмотря на наличие коммерческих технологий микробного получения γ-ПГК, их широкое внедрение ограничивается высокой себестоимостью процесса, значительная часть которой связана с источниками углерода. Целесообразным решением является использование агропромышленных отходов в качестве субстратов для твердофазной ферментации, которая по сравнению с жидкофазной ферментацией характеризуется более простым аппаратурным оформлением, низкой стоимостью и высокой продуктивностью [29, 30]. Использование мелассы как источника легко сбраживаемых сахаров также рассматривается как экономически привлекательный подход к биосинтезу γ-ПГК штаммами *Bacillus velezensis* [31].

Биоферменты

Ферменты — белковые биокатализаторы, ускоряющие биохимические реакции за счет снижения энергии активации без изменения собственной структуры [32]. Они синтезируются различными живыми организмами, однако микроорганизмы – бактерии, дрожжи и грибы – считаются наиболее перспективными продуцентами благодаря быстрому росту, разнообразию биохимических свойств, возможности генетической модификации и относительной простоте масштабирования процесса. Получение микробных ферментов может осуществляться методами твердофазной или глубинной ферментации в периодическом, непрерывном режиме либо в режиме с подпиткой.

Агропромышленные отходы рассматриваются как дешевые и экологически приемлемые субстраты, служащие источником углерода и энергии для роста микроорганизмов и синтеза ферментов [10]. Такие биокатализаторы широко применяются в пищевой, кожевенной, целлюлозно-бумажной, моющей, фармацевтической, текстильной и косметической промышленности [16]. В одной из работ опилки деревообрабатывающей промышленности применялись для получения лакказы грибом *Coriolopsis gallica*.

Амилазы катализируют расщепление крахмала, олигосахаридов и полисахаридов до простых сахаров, включая глюкозу, фруктозу и мальтозу [18]. В качестве субстратов для получения микробных амилаз могут использоваться фруктовые и овощные отходы, картофельная кожура, яблочные выжимки, финиковые и банановые отходы, пшеничные и рисовые отруби, кукурузные початки, соевая шелуха и хлебные отходы [13]. Кроме амилаз, при переработке растительного сырья важную роль играют целлюлазы, ксиланазы, пектиназы, липазы и эстеразы, обеспечивающие гидролиз полисахаридов, липидов и лигноцеллюлозных компонентов биомассы.

Бактериальная целлюлоза

Бактериальная целлюлоза (БЦ) является универсальным биополимером, применяемым в медицине, косметологии, пищевой промышленности, а также при получении сорбентов, бумаги, тканей, фильтрующих и упаковочных материалов. Несмотря на широкий спектр применения, промышленное производство БЦ ограничивается высокой себестоимостью и сложностью масштабирования, поэтому перспективным направлением считается использование альтернативных субстратов и питательных сред вместо традиционной среды Хестрина–Шрамма [33].

Свойства БЦ зависят от штамма-продуцента и условий культивирования, поэтому для ее получения применяют стационарный и глубинный методы. При стационарном культивировании формируются пленки бактериальной целлюлозы, однако этот способ требует значительных трудозатрат [34]. Глубинное культивирование позволяет получать БЦ в виде сфер или волокон, проводить процесс в ферментерах и повышать его пригодность для промышленного масштабирования.

Продуцентами бактериальной целлюлозы являются бактерии родов *Acetobacter, Gluconobacter, Komagataeibacter, Rhizobium, Agrobacterium* и *Sarcina*, при этом наиболее изученным продуцентом считается аэробная бактерия *Komagataeibacter xylinus*, способная использовать различные источники углерода и азота [35]. Традиционно для получения БЦ применяют среду Хестрина–Шрамма, содержащую глюкозу, пептон и дрожжевой экстракт, однако для снижения себестоимости активно исследуется возможность замены стандартных компонентов сельскохозяйственными отходами и промышленными побочными продуктами [35].

В работе Е.А. Скибы и соавт. бактериальная целлюлоза была получена из овсяной шелухи с использованием симбиотической культуры *Medusomyces gisevii*: предварительная обработка сырья растворами HNO_3 с последующим ферментативным гидролизом позволила получить сахаросодержащий субстрат для биосинтеза БЦ [24]. В опытно-промышленных условиях из 100 т овсяной шелухи было получено 80,5 т гидрогеля БЦ с влажностью 98 %. Также показана возможность получения композита бактериальная целлюлоза/гуммиарабик на гидролизате остатков лаванды, причем такой композит характеризовался более высоким индексом кристалличности по сравнению с чистой БЦ [36].

Биопластики и микробные биополимеры

Биопластики представляют собой полимеры биологического происхождения, получаемые из возобновляемого сырья, включая углеводы, растительные масла и другие органические субстраты, в том числе с участием микроорганизмов [37]. По своим физико-химическим свойствам они могут быть близки к синтетическим пластикам, однако способны к микробному разложению в аэробных или анаэробных условиях с образованием CO_2, воды и биомассы. К основным видам биопластиков относятся полигидроксибутират (ПГБ), полигидроксиалканоаты (ПГА), полигликолевая кислота (ПГК) и полимолочная кислота (ПМК), применяемые при производстве одноразовых упаковочных материалов, покрытий, медицинских изделий, носителей лекарственных веществ и других продуктов [37, 38].

Микробные биополимеры синтезируются микроорганизмами в процессе метаболизма и состоят из повторяющихся мономерных звеньев, способных к разложению в окружающей среде [39, 40]. В качестве сырья для их получения могут использоваться растительная биомасса, сельскохозяйственные отходы и побочные продукты промышленной переработки [29]. Особый интерес представляют отходы растительного происхождения, поскольку они содержат доступные углеводные компоненты и могут служить субстратами для ферментативного получения биополимеров, в том числе полигидроксиалканоатов [41].

Особое значение среди микробных биополимеров имеют ПГА – линейные полиэфиры,

синтезируемые различными грамотрицательными и грамположительными бактериями, включая виды *Pseudomonas, Cupriavidus necator*, а также некоторые цианобактерии [42, 43]. ПГА накапливаются в клетках как запасные соединения углерода и энергии, как правило, при избытке углеродного субстрата и дефиците отдельных питательных элементов. Для промышленного получения ПГА могут использоваться возобновляемые источники сырья, включая сахара, масла и органические отходы, однако продуктивность процесса определяется свойствами штамма, составом питательной среды и оптимизацией условий культивирования [44].

Одним из наиболее изученных продуцентов ПГА является *Cupriavidus necator*; при использовании фруктозы в качестве единственного источника углерода выход ПГБ составлял 1,207 г/л, тогда как добавление комбинации субстратов, включая фруктозу, пропанол и мясной экстракт, способствовало повышенному образованию сополимера ПГБВ [45]. Получение ПГБВ представляет практический интерес, поскольку этот сополиэфир обладает лучшими эксплуатационными свойствами по сравнению с более хрупким ПГБ [45]. Промышленное производство ПГА обычно включает ферментационный синтез полимера, отделение и обработку клеточной биомассы, экстракцию, очистку, осаждение и сушку целевого продукта [47].

Биоразлагаемые полимеры, включая полисахариды и белки, активно исследуются в качестве основы для пленок, покрытий и упаковки, в том числе пищевой и интеллектуальной упаковки для контроля свежести продуктов. В одном из исследований изучено влияние целлюлозы чайного гриба и её гидролизатов на свойства биоразлагаемых пленок, полученных из возобновляемого сырья – агара и альгината. Был предложен одноэтапный способ получения пленочных материалов с повышенной механической прочностью без снижения их биоразлагаемости, что подтверждает перспективность использования побочных продуктов ферментации для улучшения свойств упаковочных материалов [48].

Применение биополимеров в биоразлагаемых упаковочных материалах

Для применения в упаковке биополимерные материалы должны обладать достаточной механической прочностью, барьерными свойствами по отношению к влаге и газам, термической стабильностью, безопасностью при контакте с пищевыми продуктами и контролируемой скоростью биоразложения. Основными ограничениями таких материалов остаются высокая стоимость, чувствительность к влаге, недостаточная прочность по сравнению с нефтехимическими полимерами и сложности масштабирования. Использование растительных отходов как субстратов биоконверсии позволяет частично снизить себестоимость биополимеров и повысить экологическую эффективность упаковочных решений.

Таблица 1.

Продукты биоконверсии растительных отходов и их значение для биоразлагаемой упаковки

Table 1.

Bioconversion products of plant waste and their importance for biodegradable packaging

Продукт биоконверсии Bioconversion product	Сырье/субстрат Raw Material/Substrate	Метод получения Method of obtaining	Функция в упаковочных материалах Function in Packaging Materials	Источники Ref
Молочная кислота Lactic acid	овсяная лузга, мискантус, пивная дробина, другие лигноцеллюлозные отходы oat husks, miscanthus, brewer's grains, other lignocellulosic waste	микробная ферментация гидролизатов Microbial fermentation of hydrolysates	прекурсор полилактида и других биоразлагаемых полиэфиров precursor of polylactide and other biodegradable polyesters	[23–25]
γ-ПГК poly-γ-glutamic acid (γ-PGA)	опилки, меласса, агропромышленные отходы sawdust, molasses, agro-industrial waste	твердофазная и глубинная ферментация Bacillus spp. solid-phase and submerged fermentation of Bacillus spp.	пленкообразующий и влагоудерживающий компонент биополимерных композиций film-forming and moisture-retaining component of biopolymer compositions	[27–31]
Биоферменты Bioenzymes	кожура, отруби, лузга, крахмал- и целлюлозосодержащие отходы peel, bran, husks, starch and cellulose waste	твердофазная или глубинная ферментация Solid-phase or deep fermentation	гидролиз сырья, повышение доступности сахаров для дальнейшей биоконверсии hydrolysis of raw materials, increasing the availability of sugars for further bioconversion	[13, 15, 18, 32]
Бактериальная целлюлоза Bacterial cellulose	овсяная шелуха, гидролизаты растительных остатков oat husks, hydrolysates of plant residues	стационарное или глубинное культивирование продуцентов БЦ stationary or deep cultivation of BC producers	пленкообразующий и армирующий компонент, повышение прочности и барьерных свойств film-forming and reinforcing component, increasing strength and barrier properties	[24, 33, 35, 36]
ПГА/ПГБ PHA/PHB	сахара, масла, пищевые и растительные отходы sugars, oils, food and vegetable waste	микробная ферментация с накоплением полимера в клетках Microbial fermentation with polymer accumulation in cells	основа биоразлагаемых пленок, покрытий и формованных материалов Base of biodegradable films, coatings and molded materials	[7, 41–44, 46]

Таким образом, продукты биоконверсии растительных отходов могут выполнять различные функции в составе биоразлагаемых упаковочных материалов: молочная кислота служит прекурсором полилактида, бактериальная целлюлоза может выступать пленкообразующим и армирующим компонентом, ферменты обеспечивают гидролиз растительного сырья и повышение доступности сахаров, а полигидроксиалканоаты и другие микробные биополимеры формируют основу биоразлагаемых пленок, покрытий и композитов.

Заключение

Биоконверсия растительных и агропромышленных органических отходов является перспективным направлением их переработки, позволяющим одновременно снижать экологическую нагрузку и получать ценные биопродукты. В результате микробиологических и ферментативных процессов из отходов могут быть получены органические кислоты, ферменты, полиэфиры, бактериальная целлюлоза, поли-γ-глутаминовая кислота и другие биополимеры, применимые при создании биоразлагаемых упаковочных материалов.

Для упаковочной отрасли наибольшее значение среди продуктов биоконверсии имеют молочная кислота, бактериальная целлюлоза, полигидроксиалканоаты и поли-γ-глутаминовая кислота. Они различаются как по роли в составе материала — от полимерной основы до функциональной добавки, — так и по требованиям к сырью и условиям ферментации, что определяет выбор субстрата и штамма-продуцента под конкретную задачу.

Анализ литературных данных показывает, что эффективность биоконверсии определяется составом сырья, выбранным штаммом-продуцентом, типом ферментации, предварительной обработкой биомассы и условиями проведения процесса. Использование растительных и пищевых отходов в качестве субстратов позволяет снизить стоимость получения биопродуктов и способствует развитию ресурсосберегающих технологий. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию ферментационных процессов, повышение прочностных и барьерных свойств биополимерных материалов, а также оценку их безопасности и биоразлагаемости в условиях практического применения.

Литература

1 Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization // Egyptian Journal of Petroleum. 2018. V. 27. № 4. P. 1275–1290. doi: 10.1016/j.ejpe.2018.07.003

2 Beyene H.D., Werkneh A.A., Ambaye T.G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review // Renewable Energy Focus. 2018. V. 24. P. 1–11. doi: 10.1016/j.ref.2017.11.001

3 Quijano L. et al. Bacterial cellulose cookbook: A systematic review on sustainable and cost-effective substrates // Journal of Bioresources and Bioproducts. 2024. V. 9. № 4. P. 379–409. doi: 10.1016/j.jobab.2024.05.001

4 Abu Yazid N., Barrena R., Komilis D., Sánchez A. Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: a review // Sustainability. 2017. V. 9. № 2. P. 224. doi: 10.3390/su9020224

5 Bhat S.A., Singh J., Vig A.P. Earthworms as organic waste managers and biofertilizer producers // Waste and Biomass Valorization. 2018. V. 9. P. 1073–1086. doi: 10.1007/s12649-017-9899-8

6 Kee P.E., Cheng Y.S., Chang J.S. et al. Insect biorefinery: A circular economy concept for biowaste conversion to value-added products // Environmental Research. 2023. V. 221. P. 115284. doi: 10.1016/j.envres.2023.115284

7 Winnacker M. Polyhydroxyalkanoates: recent advances in their synthesis and applications // European Journal of Lipid Science and Technology. 2019. V. 121. № 11. P. 1900101. doi: 10.1002/ejlt.201900101

8 Cho E.J., Trinh L.T.P., Song Y. et al. Bioconversion of biomass waste into high value chemicals // Bioresource Technology. 2020. V. 298. P. 122386. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122386

9 Kiruba N.J.M., Saeid A. An insight into microbial inoculants for bioconversion of waste biomass into sustainable "bio-organic" fertilizers: a bibliometric analysis and systematic literature review // International Journal of Molecular Sciences. 2022. V. 23. № 21. P. 13049. doi: 10.3390/ijms232113049

10 Tang B. et al. Conversion of agroindustrial residues for high poly(γ-glutamic acid) production by Bacillus subtilis NX-2 via solid-state fermentation // Bioresource Technology. 2015. V. 181. P. 351–354. doi: 10.1016/j.biortech.2015.01.047

11 Yadegary M., Hamidi A., Alavi S.A. et al. Citric acid production from sugarcane bagasse through solid state fermentation method using Aspergillus niger mold and optimization of citric acid production by Taguchi method // Jundishapur Journal of Microbiology. 2013. V. 6. № 9. P. e12684. doi: 10.5812/jjm.12684

12 Rehman A., Alam M.M., Ozturk I. et al. Globalization and renewable energy use: how are they contributing to upsurge the CO2 emissions? A global perspective // Environmental Science and Pollution Research. 2023. V. 30. № 4. P. 9699–9712. doi: 10.1007/s11356-022-22734-1

13 Arya P.S., et al. Valorization of agro-food wastes: Ease of concomitant-enzymes production with application in food and biofuel industries // Bioresource Technology. 2022. V. 361. P. 127738. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127738

14 Sharma P., Gaur V.K., Kim S.H., Pandey A. Microbial strategies for bio-transforming food waste into resources // Bioresource Technology. 2020. V. 299. P. 122580. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122580

15 Sharma V., Tsai M.L., Nargotra P. et al. Agro-industrial food waste as a low-cost substrate for sustainable production of industrial enzymes: a critical review // Catalysts. 2022. V. 12. № 11. P. 1373. doi: 10.3390/catal12111373

16 Adetunji A.I., Olaniran A.O. Production and potential biotechnological applications of microbial surfactants: An overview // Saudi Journal of Biological Sciences. 2021. V. 28. № 1. P. 669–679. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.10.058

17 Adetunji A.I., Olaniran A.O. Statistical modelling and optimization of protease production by an autochthonous Bacillus aryabhattai Ab15-ES: A response surface methodology approach // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020. V. 24. P. 101528. doi: 10.1016/j.bcab.2020.101528

18 Chilakamarry C.R., Sakinah A.M., Zularisam A.W. et al. Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities and challenges // Bioresource Technology. 2022. V. 343. P. 126065. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126065

19 Alam M.Z., Bari M.N., Muyibi S.A., Jamal P. Development of culture inoculum for scale-up production of citric acid from oil palm empty fruit bunches by Aspergillus niger // Procedia Environmental Sciences. 2011. V. 8. P. 396–402. doi: 10.1016/j.proenv.2011.10.062

20 Pleissner D. et al. Direct production of lactic acid based on simultaneous saccharification and fermentation of mixed restaurant food waste // Journal of Cleaner Production. 2017. V. 143. P. 615–623. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.065

21 Pandian A.M.K., Rajasimman M., Rajamohan N. et al. Anaerobic mixed consortium (AMC) mediated enhanced biosynthesis of silver nano particles (AgNPs) and its application for the removal of phenol // Journal of Hazardous Materials. 2021. V. 416. P. 125717. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125717

22 Komesu A. et al. Lactic acid production to purification: a review // BioResources. 2017. V. 12. P. 4364–4383. doi: 10.15376/biores.12.2.4364-4383

23 Osman Y., Abd Elrazak A., Khater W. Microbial biopolymer production by Microbacterium WA81 in batch fermentation // Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences. 2016. V. 3. № 3. P. 250–262. doi: 10.1016/j.ejbas.2016.05.001

24 Skiba E.A., Budaeva V.V., Ovchinnikova E.V. et al. Technology for pilot-scale production of bacterial cellulose from oat hulls // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 383. P. 123128. doi: 10.1016/j.cej.2019.123128

25 Mussatto S.I. et al. Brewer's spent grain as raw material for lactic acid production by Lactobacillus delbrueckii // Biotechnology Letters. 2007. V. 29. № 12. P. 1973–1976. doi: 10.1007/s10529-007-9494-3

26 Yuvaraj A., Thangaraj R., Ravindran B. et al. Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology – A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability // Environmental Pollution. 2021. V. 268. P. 115688. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115688

27 Luo Z. et al. Microbial synthesis of poly-γ-glutamic acid: current progress, challenges, and future perspectives // Biotechnology for Biofuels. 2016. V. 9. P. 134. doi: 10.1186/s13068-016-0537-7

28 Zhang C., Ren H., Zhong C. Preparation of γ-polyglutamic acid from enzymatic hydrolysate of poplar sawdust // Arabian Journal of Chemistry. 2021. V. 14. № 4. P. 103095. doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103095

29 Hsueh Y.-H., . et al. Poly-γ-glutamic Acid Synthesis, Gene Regulation, Phylogenetic Relationships, and Role in Fermentation. International Journal of Molecular Sciences. 2017. vol. 18. article 2644. doi: 10.3390/ijms18122644.

30 Nair A.S. et al. Microbial production of poly-γ-glutamic acid: current state and future perspectives // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. V. 11. P. 1–18. doi: 10.1007/s13399-020-00689-1

31 Moraes L.P., Alegre R.M., Brito P.N. Optimisation of poly(γ-glutamic acid) production by Bacillus velezensis NRRL B-23189 in liquid fermentation with molasses as the carbon source without addition of glutamic acid // International Review of Chemical Engineering. 2012. V. 4. P. 618–623.

32 Gurung N., Ray S., Bose S., Rai V. A broader view: microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond. BioMed Research International. 2013. vol. 2013. article 329121. doi: 10.1155/2013/329121.

33 Громовых П.С., Бахман М., Петрухин И.Ю. и др. Биосинтез бактериальной целлюлозы продуцентом Gluconacetobacter hansenii в глубинной культуре // Евразийское научное объединение. 2018. № 6–2. С. 61–65.

34 Рогова Е.А., Кононов Г.Н., Веревкин А.Н. и др. Состояние и перспективы совершенствования способов получения и применения бактериальной целлюлозы // Химия растительного сырья. 2022. № 4. С. 27–46. doi: 10.14258/jcprm.20220410510

35 Jia H.P., Wang X.L., Liu Z.W. et al. Bacterial cellulose/gum Arabic composite production by in-situ modification from lavender residue hydrolysate // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. V. 253. P. 126961. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126961

36 Adetunji A.I., Oberholster P.J., Erasmus M. From garbage to treasure: A review on biorefinery of organic solid wastes into valuable biobased products // Bioresource Technology Reports. 2023. V. 24. P. 101610. doi: 10.1016/j.biteb.2023.101610

37 Nair P., Navale G.R., Dharne M.S. Poly-gamma-glutamic acid biopolymer: A sleeping giant with diverse applications and unique opportunities for commercialization // Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. V. 13. P. 4555–4573. doi: 10.1007/s13399-021-01561-3

38 Khademian E.. et al. A systematic review on carbohydrate biopolymers for adsorptive remediation of copper ions from aqueous environments – part A: Classification and modification strategies // Science of the Total Environment. 2020. V. 738. P. 139829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139829

39 Panda S.K. et al. Microbial-processing of fruit and vegetable wastes for production of vital enzymes and organic acids: Biotechnology and scopes // Environmental Research. 2016. V. 146. P. 161–172. doi: 10.1016/j.envres.2015.12.035

40 Liu H., Kumar V., Jia L. et al. Biopolymer polyhydroxyalkanoates (PHA) production from apple industrial waste residues: A review // Chemosphere. 2021. V. 284. P. 131427. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131427

41 Mozejko-Ciesielska J., Marciniak P., Szacherska K. Polyhydroxyalkanoates synthesized by Aeromonas species: trends and challenges // Polymers. 2019. V. 11. P. 1328. doi: 10.3390/polym11081328

42 Mozejko-Ciesielska J., . et al. Pseudomonas species as producers of eco-friendly polyhydroxyalkanoates // Journal of Polymers and the Environment. 2019. V. 27. P. 1151–1166. doi: 10.1007/s10924-019-01402-5

43 Costa J.A.V., Moreira J.B., Lucas B.F. et al. Recent advances and future perspectives of PHB production by cyanobacteria // Industrial Biotechnology. 2018. V. 14. № 5. P. 249–256. doi: 10.1089/ind.2018.0017

44 Wang K., Shen G.Q., Choi S. Empirical and instrumental approaches: The influence of interactions and complementary norms on recycling intention // Journal of Self Psychology. 2017. V. 50. P. 69–79.

45 Ladhari S., Vu N.N., Boisvert C. et al. Recent development of polyhydroxyalkanoates (PHA) – based materials for antibacterial applications: a review // ACS Applied Bio Materials. 2023. V. 6. № 4. P. 1398–1430. doi: 10.1021/acsabm.3c00004

46 Nguyen C.M. et al. Production of L- and D-lactic acid from waste Curcuma longa biomass through simultaneous saccharification and cofermentation. Bioresource Technology. 2013. vol. 146. pp. 35–43. doi: 10.1016/j.biortech.2013.07.035.

47 He S., Wu Y., Zhang Y. et al. Enhanced mechanical strength of vortex fluidic mediated biomass-based biodegradable films composed from agar, alginate and kombucha cellulose hydrolysates // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. V. 253. Pt. 7. P. 127076. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127076

References

1 Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. Egyptian Journal of Petroleum. 2018. vol. 27. no. 4. pp. 1275–1290. doi: 10.1016/j.ejpe.2018.07.003.

2 Beyene H.D., Werkneh A.A., Ambaye T.G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. Renewable Energy Focus. 2018. vol. 24. pp. 1–11. doi: 10.1016/j.ref.2017.11.001.

3 Quijano L. et al. Bacterial cellulose cookbook: A systematic review on sustainable and cost-effective substrates. Journal of Bioresources and Bioproducts. 2024. vol. 9. no. 4. pp. 379–409.

4 Abu Yazid N., Barrena R., Komilis D., Sánchez A. Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: a review. Sustainability. 2017. vol. 9. no. 2. article 224. doi: 10.3390/su9020224.

5 Bhat S.A., Singh J., Vig A.P. Earthworms as organic waste managers and biofertilizer producers. Waste and Biomass Valorization. 2018. vol. 9. pp. 1073–1086. doi: 10.1007/s12649-017-9899-8.

6 Kee P.E., Cheng Y.S., Chang J.S. et al. Insect biorefinery: A circular economy concept for biowaste conversion to value-added products. Environmental Research. 2023. vol. 221. article 115284. doi: 10.1016/j.envres.2023.115284.

7 Winnacker M. Polyhydroxyalkanoates: recent advances in their synthesis and applications. European Journal of Lipid Science and Technology. 2019. vol. 121. no. 11. article 1900101. doi: 10.1002/ejlt.201900101.

8 Cho E.J., Trinh L.T.P., Song Y. et al. Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. Bioresource Technology. 2020. vol. 298. article 122386. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122386.

9 Kiruba N.J.M., Saeid A. An insight into microbial inoculants for bioconversion of waste biomass into sustainable "bio-organic" fertilizers: a bibliometric analysis and systematic literature review. International Journal of Molecular Sciences. 2022. vol. 23. no. 21. article 13049. doi: 10.3390/ijms232113049.

10 Tang B. et al. Conversion of agroindustrial residues for high poly(γ-glutamic acid) production by Bacillus subtilis NX-2 via solid-state fermentation. Bioresource Technology. 2015. vol. 181. pp. 351–354. doi: 10.1016/j.biortech.2015.01.047.

11 Yadegary M., Hamidi A., Alavi S.A. et al. Citric acid production from sugarcane bagasse through solid state fermentation method using Aspergillus niger mold and optimization of citric acid production by Taguchi method. Jundishapur Journal of Microbiology. 2013. vol. 6. no. 9. article e12684. doi: 10.5812/jjm.12684.

12 Rehman A., Alam M.M., Ozturk I. et al. Globalization and renewable energy use: how are they contributing to upsurge the CO2 emissions? A global perspective. Environmental Science and Pollution Research. 2023. vol. 30. no. 4. pp. 9699–9712. doi: 10.1007/s11356-022-22734-1.

13 Arya P.S., Yagnik S.M., Rajput K.N. et al. Valorization of agro-food wastes: Ease of concomitant-enzymes production with application in food and biofuel industries. Bioresource Technology. 2022. vol. 361. article 127738. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127738.

14 Sharma P., Gaur V.K., Kim S.H., Pandey A. Microbial strategies for bio-transforming food waste into resources. Bioresource Technology. 2020. vol. 299. article 122580. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122580.

15 Sharma V., Tsai M.L., Nargotra P. et al. Agro-industrial food waste as a low-cost substrate for sustainable production of industrial enzymes: a critical review. Catalysts. 2022. vol. 12. no. 11. article 1373. doi: 10.3390/catal12111373.

16 Adetunji A.I., Olaniran A.O. Production and potential biotechnological applications of microbial surfactants: An overview. Saudi Journal of Biological Sciences. 2021. vol. 28. no. 1. pp. 669–679. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.10.058.

17 Adetunji A.I., Olaniran A.O. Statistical modelling and optimization of protease production by an autochthonous Bacillus aryabhattai Ab15-ES: A response surface methodology approach. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020. vol. 24. article 101528. doi: 10.1016/j.bcab.2020.101528.

18 Chilakamarry C.R., Sakinah A.M., Zularisam A.W. et al. Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities and challenges. Bioresource Technology. 2022. vol. 343. article 126065. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126065.

19 Alam M.Z., . et al. Development of culture inoculum for scale-up production of citric acid from oil palm empty fruit bunches by Aspergillus niger. Procedia Environmental Sciences. 2011. vol. 8. pp. 396–402. doi: 10.1016/j.proenv.2011.10.062.

20 Pleissner D. et al. Direct production of lactic acid based on simultaneous saccharification and fermentation of mixed restaurant food waste. Journal of Cleaner Production. 2017. vol. 143. pp. 615–623. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.065.

21 Pandian A.M.K., Rajasimman M., Rajamohan N. et al. Anaerobic mixed consortium (AMC) mediated enhanced biosynthesis of silver nano particles (AgNPs) and its application for the removal of phenol. Journal of Hazardous Materials. 2021. vol. 416. article 125717. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125717.

22 Komesu A. et al. Lactic acid production to purification: a review. BioResources. 2017. vol. 12. pp. 4364–4383. doi: 10.15376/biores.12.2.4364-4383.

23 Osman Y., . et al. Microbial biopolymer production by Microbacterium WA81 in batch fermentation. Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences. 2016. vol. 3. no. 3. pp. 250–262. doi: 10.1016/j.ejbas.2016.05.001.

24 Skiba E.A., Budaeva V.V., Ovchinnikova E.V. et al. Technology for pilot-scale production of bacterial cellulose from oat hulls. Chemical Engineering Journal. 2020. vol. 383. article 123128. doi: 10.1016/j.cej.2019.123128.

25 Mussatto S.I. et al. Brewer's spent grain as raw material for lactic acid production by Lactobacillus delbrueckii. Biotechnology Letters. 2007. vol. 29. no. 12. pp. 1973–1976. doi: 10.1007/s10529-007-9494-3.

26 Yuvaraj A., Thangaraj R., Ravindran B. et al. Centrality of cattle solid wastes in vermicomposting technology – A cleaner resource recovery and biowaste recycling option for agricultural and environmental sustainability. Environmental Pollution. 2021. vol. 268. article 115688. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115688.

27 Luo Z. et al. Microbial synthesis of poly-γ-glutamic acid: current progress, challenges, and future perspectives. Biotechnology for Biofuels. 2016. vol. 9. article 134. doi: 10.1186/s13068-016-0537-7.

28 Zhang C., Ren H., Zhong C. Preparation of γ-polyglutamic acid from enzymatic hydrolysate of poplar sawdust. Arabian Journal of Chemistry. 2021. vol. 14. no. 4. article 103095. doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103095.

29 Hsueh Y.-H., . et al.Poly-γ-glutamic Acid Synthesis, Gene Regulation, Phylogenetic Relationships, and Role in Fermentation. International Journal of Molecular Sciences. 2017. vol. 18. article 2644. doi: 10.3390/ijms18122644.

30 Nair A.S. et al. Microbial production of poly-γ-glutamic acid: current state and future perspectives. Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. vol. 11. pp. 1–18. doi: 10.1007/s13399-020-00689-1.

31 Moraes L.P. et al.Optimisation of poly(γ-glutamic acid) production by Bacillus velezensis NRRL B-23189 in liquid fermentation with molasses as the carbon source without addition of glutamic acid. International Review of Chemical Engineering. 2012. vol. 4. pp. 618–623.

32 Gurung N., Ray S., Bose S., Rai V. A broader view: microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond. BioMed Research International. 2013. vol. 2013. article 329121. doi: 10.1155/2013/329121.

33 Gromovykh P.S., Bakhman M., Petrukhin I.Yu. et al. Biosynthesis of bacterial cellulose by the producer Gluconacetobacter hansenii in submerged culture. Eurasian Scientific Association. 2018. no. 6–2. pp. 61–65. (in Russian).

34 Rogova E.A., Kononov G.N., Verevkin A.N. et al. State and prospects for improving methods for obtaining and using bacterial cellulose. Chemistry of Plant Raw Materials. 2022. no. 4. pp. 27–46. doi: 10.14258/jcprm.20220410510 (in Russian).

35 Jia H.P., Wang X.L., Liu Z.W. et al. Bacterial cellulose/gum Arabic composite production by in-situ modification from lavender residue hydrolysate. International Journal of Biological Macromolecules. 2023. vol. 253. article 126961. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126961.

36 Adetunji A.I. et al. From garbage to treasure: A review on biorefinery of organic solid wastes into valuable biobased products. Bioresource Technology Reports. 2023. vol. 24. article 101610. doi: 10.1016/j.biteb.2023.101610.

37 Nair P., Navale G.R., Dharne M.S. Poly-gamma-glutamic acid biopolymer: A sleeping giant with diverse applications and unique opportunities for commercialization. Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. vol. 13. pp. 4555–4573. doi: 10.1007/s13399-021-01561-3.

38 Khademian E., Salehi E., Sanaeepur H. et al. A systematic review on carbohydrate biopolymers for adsorptive remediation of copper ions from aqueous environments – part A: Classification and modification strategies. Science of the Total Environment. 2020. vol. 738. article 139829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139829.

39 Panda S.K. et al. Microbial-processing of fruit and vegetable wastes for production of vital enzymes and organic acids: Biotechnology and scopes. Environmental Research. 2016. vol. 146. pp. 161–172. doi: 10.1016/j.envres.2015.12.035.

40 Liu H., Kumar V., Jia L. et al. Biopolymer polyhydroxyalkanoates (PHA) production from apple industrial waste residues: A review. Chemosphere. 2021. vol. 284. article 131427. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131427.

41 Mozejko-Ciesielska J., Marciniak P., Szacherska K. Polyhydroxyalkanoates synthesized by Aeromonas species: trends and challenges. Polymers. 2019. vol. 11. article 1328. doi: 10.3390/polym11081328.

42 Mozejko-Ciesielska J. et al. Pseudomonas species as producers of eco-friendly polyhydroxyalkanoates. Journal of Polymers and the Environment. 2019. vol. 27. pp. 1151–1166. doi: 10.1007/s10924-019-01402-5.

43 Costa J.A.V., Moreira J.B., Lucas B.F. et al. Recent advances and future perspectives of PHB production by cyanobacteria. Industrial Biotechnology. 2018. vol. 14. no. 5. pp. 249–256. doi: 10.1089/ind.2018.0017.

44 Wang K., Shen G.Q., Choi S. Empirical and instrumental approaches: The influence of interactions and complementary norms on recycling intention. Journal of Self Psychology. 2017. vol. 50. pp. 69–79.

45 Ladhari S.et al. Recent development of polyhydroxyalkanoates (PHA) – based materials for antibacterial applications: a review. ACS Applied Bio Materials. 2023. vol. 6. no. 4. pp. 1398–1430. doi: 10.1021/acsabm.3c00004.

46 Nguyen C.M., Kim J.S., Nguyen T.N., Kim S.K., Choi G.J., Choi Y.H., Jang K.S., Kim J.C. Production of L- and D-lactic acid from waste Curcuma longa biomass through simultaneous saccharification and cofermentation. Bioresource Technology. 2013. vol. 146. pp. 35–43. doi: 10.1016/j.biortech.2013.07.035.

47 He S., Wu Y., Zhang Y. et al. Enhanced mechanical strength of vortex fluidic mediated biomass-based biodegradable films composed from agar, alginate and kombucha cellulose hydrolysates. International Journal of Biological Macromolecules. 2023. vol. 253. pt. 7. article 127076. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127076.

Сведения об авторах

Марал Бердимуратова аспирант, кафедра химии, технологии полимеров и упаковочных решений, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 1, г. Москва, 125080, Россия, maral.berdimuratova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4894-8621

Ирина А. Кирш д.х.н., профессор, заведующий кафедрой химии, технологии полимеров и упаковочных решений, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 1, г. Москва, 125080, Россия, kirshia@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0003-3370-4226

Information about authors

Maral Berdimuratova graduate student, Department of Chemistry, Polymer Technology, and Packaging Solutions, Russian Biotechnological University, Volokolamskoe h., 11, Moscow, 125080, Russia, maral.berdimuratova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-4894-8621

Irina A. Kirsh Dr. Sci. (Chem.), professor, Department of Chemistry, Polymer Technology, and Packaging Solutions, Russian Biotechnological University, Volokolamskoe h., 11, Moscow, 125080, Russia, kirshia@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0003-3370-4226

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/04/2026	**После редакции** 08/06/2026	**Принята в печать** 13/07/2026
Received 22/04/2026	**Accepted in revised** 08/06/2026	**Accepted** 13/07/2026