

УДК 338.001.36

DOI: 10.17586/2310-1172-2022-17-3-69-81

Научная статья

Анализ современных тенденций развития бизнеса по производству биоматериалов в контексте экономики замкнутого цикла

Рахманова К.Р. karina.rakhmanova@itmo.ru

Кузнецова А.П. apkuznetcova@itmo.ru

Канд. техн. наук **Молодкина Н.Р.** molodkinanelli@gmail.com

Канд. техн. наук **Сергиенко О.И.** oisergienko@yandex.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Проблема роста пластиковых отходов остается наиболее актуальной повесткой в мире и в России. Управление отходами из традиционных пластиков, включающее в себя утилизацию, вторичное использование и переработку, сталкивается с проблемой сбора вторичного пластика. Альтернативой может быть использование биоразлагаемых материалов, в том числе перспективных биокомпозитов, получаемых из возобновляемого сырья, армированных натуральными волокнами. Предметом исследования являются тенденции развития бизнеса биокомпозитов на основе мицелия различных видов грибов. Использование мицелия можно отнести к движению биомимикрии, которая считается перспективным подходом для создания и реализации новых технологических решений. Целью работы является изучение и оценка международного рынка материалов из мицелия, концепции создания новых продуктов, их применения и позиционирования. Проведен обзор областей использования биокомпозитов из мицелия грибов, изучен потенциал их применения в качестве экологичной продукции на рынке. Осуществлен поиск и анализ компаний-производителей, выявлены основные особенности их бизнес-моделей и факторы, влияющие на ведение бизнеса, описаны модели продаж продукции из мицелия. Впервые применена концепция “трех экономик” устойчивого развития в отношении биокомпозитов, особое внимание уделено понятию экономике замкнутого цикла и внедрение ее принципов в контексте компаний-производителей. Проанализирован вопрос биоразлагаемости продукции из мицелия. Проведенный анализ позволяет сделать выводы о перспективности применения мицелия в качестве основы биокомпозита, реализуемости создания товарных продуктов из него и о наиболее успешных примерах выстраивания бизнеса, основанного на мицелии. По итогам проведенной исследовательской работы можно утверждать, что применение мицелия и создание новых бизнес-проектов, с учетом опыта международных компаний, является перспективным в России.

Ключевые слова: биокомпозиты, мицелий, экономика замкнутого цикла, устойчивое развитие, устойчивые материалы, биоразлагаемость.

Scientific article

Analysis of current trends in the development of biomaterials business in the context of a closed-cycle economy

Rakhmanova K.R. karina.rakhmanova@itmo.ru

Kuznetcova A.P. apkuznetcova@itmo.ru

Ph.D. **Molodkina N.R.** molodkinanelli@gmail.com

Ph.D. **Sergienko O.I.** oisergienko@yandex.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, st. Lomonosov, 9

The problem of the growth of plastic waste remains the most pressing agenda in the world and in Russia. Waste management of traditional plastics, including disposal and recycling, faces the challenge of collecting remnants of recycled plastic. An alternative could be the use of biodegradable materials, including promising biocomposites obtained from renewable raw materials, reinforced with natural fibers. The subject of the study is the development trends in the

business of biocomposites based on the mycelium of various types of fungi. The use of mycelium can be attributed to the movement of biomimicry, which is considered a promising approach for the creation and implementation of new technological solutions. The purpose of the work is to study and evaluate the international market for mycelium materials, the concept of creating new products, their application and positioning. A review of mycelium biocomposites' areas of use has been carried out, and the potential for their use as an environmentally friendly product on the market has been studied. A search and analysis of manufacturing companies was conducted, the main features of their business models and factors affecting business were identified, and sales models for mycelium products were described. For the first time, the concept of "three economies" of sustainable development was applied in relation to biocomposites, special attention was paid to the concept of a circular economy and the implementation of its principles in the context of manufacturing companies. The issue of biodegradability of products from mycelium was analyzed. The analysis carried out allows us to draw conclusions about the prospects of using mycelium as the basis of a biocomposite, the feasibility of creating commercial products from it, and about the most successful examples of building a business based on mycelium. According to research results, it can be argued that the use of mycelium and the creation of new business projects, taking into account the experience of international companies, is promising in Russia.

Keywords: biocomposites, mycelium, circular economy, sustainable development, sustainable materials, biodegradability.

Введение

Актуальность и проблема

Рост населения планеты увеличивает антропогенную нагрузку на окружающую среду и неконтролируемое образование отходов производства и потребления. Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) было обозначено, что количество пластика в мировом океане к 2040 году увеличится втрое, что, в свою очередь, неизбежно приведет к «тройному кризису планетарного масштаба»: изменению климата, потере биоразнообразия и загрязнению, если не будут приняты меры по сокращению производства и потребления пластиковых материалов [1]. Следовательно, уменьшение производства соответствующих материалов, особенно предназначенных для одноразового использования, и дальнейшая замена традиционного пластика на биоразлагаемые и безопасные материалы является важной задачей для всех стран мира [2]. В настоящее время использование мицелия грибов в производстве материалов привлекает большое внимание благодаря тому, что такие материалы выступают в качестве конкурентоспособного инновационного аналога многим синтетическим материалам.

В России внедрение экологически чистых технологий становится приоритетом промышленной политики и политики отраслей народного хозяйства, поэтому разработка устойчивых и безопасных материалов представляет интерес для исследователей и производителей. Такие качества как универсальность, низкое энергопотребление, экологичность и широкий спектр функциональности, являются неотъемлемыми характеристиками для создаваемых материалов. Внедрение новых альтернативных материалов на рынок требует развития технологий и их адаптации к требованиям рынка. Поиск альтернативных экологически чистых материалов, биокomпозитов из мицелия представляется перспективным решением в области устойчивых материалов [3].

В большинстве случаев упаковка является необходимым элементом конечного продукта, она после потребления отправляется в мусор [4]. Упаковка на основе пластика не подвергается разложению, и если не будут приняты соответствующие меры по ограничению или запрету использования синтетических полимеров, то через несколько лет количество пластика в мировом океане увеличится в три раза, что приведет к сокращению биоразнообразия и ухудшению условий жизни всех живых организмов [1]. Вдобавок fashion-индустрия является одним из главных источников накопления отходов, включая гиперпотребление. Само производство текстиля загрязняет окружающую среду, поскольку популярные на рынке полиэстер и нейлон получают из нефтепродуктов, следовательно, все синтетические ткани в природе разлагаются тысячелетиями. Таким образом, в современном мире, в котором острой проблемой становится постоянное увеличение объемов отходов, вопрос поиска способов и технологий производства биоразлагаемого, инертного и доступного материала является актуальным и требует решения.

В отличие от большинства бизнес-процессов, окружающая среда характеризуется безотходностью, поскольку отходы одного процесса могут стать исходным материалом для другого не связанного с ним процесса [5]. При рассмотрении проблемы отходов электрических приборов, выдвинуто предположение о том, что, если промышленная экосистема будет подражать природным системам, переход к экономике замкнутого цикла может быть более эффективным [6]. Экономика замкнутого цикла определяется как экономика, в которой ресурсы и стоимость материалов сохраняются как можно дольше, а когда срок службы продукта подходит к концу, его можно использовать повторно [7]. К тому же переход к циклической экономике, в которой одними из ключевых элементов является минимизация отходов и их вторичное применение, выступает приоритетной задачей для большинства производств. Достоинством культивирования мицелия грибов является решением таких задач как снижение количества образующихся растениеводческих отходов за счет возможности повторного использования

разнообразных вторичных продуктов пищевых, лесоперерабатывающих и агропромышленных комплексов в качестве сырьевых ресурсов [8].

Основная часть

Мицелий – быстрорастущая вегетативная часть гриба, состоящая из тонких разветвленных нитей. Биокompозиты являются материалами из возобновляемых природных ресурсов. В частности, биокompозиты из мицелия – это материалы из мицелия и субстрата, где волокна первого компонента выступают в качестве матрицы с адгезивными свойствами. Мицелий в составе продукции обладает потенциальной биоразлагаемостью. Он не содержит опасных химических веществ, пластиков и полностью разлагается до углекислого газа и воды.

Биомимикрия – метод, имитирующий техники и процессы природы для достижения эффективности, результативности и устойчивости. Для получения материалов на основе мицелия штамм грибов подвергается инокуляции в субстрат из органических веществ. Вегетативный мицелий разлагается и колонизирует субстрат, используя продукты разложения в качестве питающих элементов для расширения своих гифов от кончика и ветвления новых гифов и слияния их вместе, образуя обильную сеть [2]. Матрица органического субстрата пронизывается мицелиальными гифами, которые развиваются внутри в виде все более плотной сети. Со временем субстрат частично заменяется грибковой биомассой, и полученный мицелий далее способен прочно цементировать сам субстрат, в результате чего получается биокompозитный материал [9].

Благодаря способности мицелия гриба образовывать сложные сети гифов и хорошо связываться с компонентами субстрата, такой комплекс обладает такими свойствами как высокая механическая прочность, невоспламеняемость и гидрофобность [10]. Связанный мицелий с субстратом представляет собой стабильный материал, который может использоваться в строительной промышленности в качестве биологических блоков, плит тепло- и звукоизоляционного материала, предметов интерьера [9].

Обзор направлений использования биокompозитов из мицелия

В настоящее время биокompозиты из мицелия имеют широкий спектр применений. Направления их использования схематично представлены на рис. 1.



Рис. 1. Схема применения мицелия грибов

Достоинствами применения биокompозитов из мицелия являются:

– экологически устойчивый продукт: материалы из мицелия способны на биологическое разложение с течением времени после окончания срока службы продукта. Материалы из пластика не обладают такой способностью, они не разлагаются тысячи лет и пополняют объем мировых отходов.

– характеристики конечного продукта: структура мицелия полностью подвергается контролю в ходе производства и, следовательно, осуществляется настройка всех необходимых эксплуатационных характеристик материала, основными из которых являются прочность, пористость, упругость [4].

– в технологиях производства применяется использование побочных продуктов, отходов различных сельскохозяйственных, пищевых и лесных комплексов в качестве субстрата для связывания с грибным мицелием. Такой способ вторичного использования различных отходов дает возможность внедрения и проведения более экологически чистой и безотходной технологии утилизации и переработки отходов соответствующих производств вместо традиционных технологий захоронения, сжигания и нейтрализации [11].

Интенсивное изучение применения мицелия для производства посуды и упаковочного материала в последние годы доказывает его преимущества с точки зрения безопасности применения согласно

токсикологическим и микробиологическим исследованиям [12]. Требуемые характеристики физико-механических свойств посуды из мицелия подтверждены в соответствии с американскими стандартами качества [13]. В России подобные стандарты не включают понятий биокomпозитов.

В сфере искусства и дизайна изделия из мицелия захватили внимание публики. Голландский дизайнер по текстилю Аниела Хойтинк создает платья, используя волокна грибного мицелия [14]. На Голландской неделе дизайна в 2019 году был представлен “растущий павильон” - временное пространство для проведения мероприятий, построенное из панелей, выращенных из грибного мицелия, опирающихся на деревянный каркас. Наружные панели данной конструкции выращены из грибов, где мицелий в корнях обеспечивал механическую прочность и стабильность. Разработан проект сценографом и художником Паскалем Лебуком в сотрудничестве со студией Эрика Кларенбека в амстердамской студии Biobased Creations [15]. В области fashion-индустрии в перспективе рассматривается, что производство искусственной кожи из мицелия удастся вывести на высокий уровень и сделать массовым, таким образом, это поможет решить серьезные этические и экологические проблемы. Об экокоже из мицелия активно заговорили еще в 2020-м: тогда The New York Times назвал разработку главным трендом полугодия. Поскольку об использовании грибной кожи под названием Mylo заявили сразу несколько гигантов модной индустрии, бренды начали сотрудничать с компанией, которая создавала для них кожзаменитель, созданный из мицелия. компания Hermès анонсировала о выпуске первой сумки Victoria. Прочный нетканый материал сделан из все тех же грибов: за производство отвечала команда Mucoworks. Наращивание биомассы мицелия проходит несколько этапов: мицелий культивируют на специальной питательной среде, где он постепенно превращается в пленку, далее грибной мицелий высушивают и отправляют на отделку и покраску [16].

Анализ компаний-производителей продукции из мицелия на международном рынке

Большинство компаний-производителей продукции из мицелия расположены в США и Европе. В Российской Федерации, как показывают результаты исследования, компании, занимающиеся разработкой продукции из мицелия, не представлены. Ecovative design [17] является ведущим экспертом в области исследований и разработок материалов на основе мицелия. Компания стремится к изменению производства материалов и продуктов, используя природные свойства мицелия. Они разрабатывает технологии, позволяющие производить компостируемые в домашних условиях биоматериалы на основе мицелия для замены пластмасс и пенопласта. Стратегия Ecovative design направлена на 5 секторов рынка: пищевые продукты (производство аналога мяса), экокожа, строительные пенопласты, упаковочные материалы и косметологические изделия. Ecovative design использует мицелий для создания таких материалов, как экологически чистая кожа, упаковка без пенополистирола, губки для макияжа, спа-тапочки, прокладки для ног и маски для лица, чтобы сократить количество отходов в индустрии красоты. Ecovative будет использовать свои средства для расширения производства грибов, расширения существующих продуктовых линеек и создания платформы для разработки новых применений мицелия с целью замены продуктов животного происхождения во многих отраслях промышленности товарами, изготовленными из инновационного материала, не содержащего животных.

Кроме того, компания занимается распространением лицензий на производство биоматериалов. Так, в 2018 году компания по производству биоматериалов Bolt Threads [18], используя технологию, лицензированную компанией и адаптированную к условиям и потребностям Bolt Threads, выпустила первую сумку из материала, похожего на кожу Mylo [19]. Основанная в 2013 году американская компания Mucoworks [20] специализируется на разработке натуральных альтернатив коже, искусственному дереву и пластмассам. Новаторская технология компании позволяет превращать сельскохозяйственные отходы в новый материал, который может конкурировать с кожей, используя быстрый, устойчивый и, по утверждениям компании, углеродно-отрицательный производственный процесс. Получаемые материалы являются мягкими, гидрофобными, воздухопроницаемыми и полностью биоразлагаемыми. В то же время он обладает прочными, универсальными, технологичными и настраиваемыми свойствами (любая желаемая толщина, узоры, плотность и 3D-функции). Изделие может быть подвержено дублению, окрашено и сформовано с использованием того же процесса, что и кожа животных, для достижения той же отделки. Итальянская компания Mogu (2015) [21] разрабатывает и продвигает технологию на основе мицелия, позволяющую превращать побочные продукты сельского хозяйства в прочные, выращенные естественным путем функциональные биоматериалы для архитектуры, моды, автомобилестроения, строительства, упаковки и других применений. Mucotech (Индонезия, 2012) [22] - компания в области материаловедения, которая создает экологически чистые строительные и конструкционные материалы на основе мицелия. Летом 2018 года компания анонсировала лимитированную серию часов, изготовленных полностью из органических материалов — дерева и шпона из мицелия (тонкий листовой материал из мицелия).

Проект Mucotex (Нидерланды, 2016) [23] направлен на создание выращенной в лаборатории одежды на заказ из биоразлагаемого материала на основе мицелия. Сочетая науку и моду и используя 3D-формование, компания Mucotex в 2018 году выпустила первые прототипы носимой одежды и обуви для покупателей [24].

Компания Everyday Oil [25] использует биокompозит из мицелия как упаковочный материал для хрупких продуктов. Компания Magical Mushroom Company [26] занимается производством устойчивой упаковки различных размеров и форм с целью замены полистирола. Для производства используют технологию партнера - Ecovative design [17]. Компания подчеркивает то, что их упаковка полностью компостируется без необходимости какого-либо внешнего химического воздействия и может быть сделано абсолютно любой формы и вида. Компания Mushroom Packaging [27] занимается производством упаковок и контейнеров из отходов производства конопли и мицелия. Утверждают, что их упаковка может быть выращена за 7 дней и полностью разлагается за 45 дней. Также начали свой путь с сотрудничества с Ecovative design [17], однако сосредоточились на производстве упаковки, а не исследованиях, и продаже продуктов и технологии. Компания Mycocrete [28] зародилась благодаря магистерскому научному проекту в Институте передовой архитектуры Каталонии (IAAC), в Барселоне. Исследование позволило выявить, что мицелий и бетон вместе с натуральным связующим формируют биоматериал, растущий со временем и, таким образом, пригодный для очистки окружающей среды. В качестве гриба используется гриб вешенка, натуральным связующим выступает кокосовое волокно. Стартап PuriFying Fungi [29] разработал технологию обеззараживания и переработки сигаретных окурков с помощью мицелия в многофункциональный композитный материал. В ходе роста грибов происходит разложение окурков и создание единого материала. Этот биокompозит обладает множеством свойств (огне- и водостойкость, механическая абсорбция и связывание углерода в процессе производства), создавая новые ресурсы для различных применений, например пепельницы, изоляционные панели и упаковка. Образовательный фонд Fungi Perfecti [30] в бизнесе с 1980 года, развивается в сфере разработок новых технологий и создания рынков для грибов по всему миру. Биотехнологический стартап из Египта Mycellium.co [31] использует мицелий, для преобразования растительных отходов, таких как рисовая и пшеничная солома, в новый материал, который является прочным, легким, устойчивым к влаге и огню и имеет неограниченную сферу применения. Mycellium.co реализует некоторые виды продуктов из мицелия, такие как акустические изоляционные панели, цветочные горшки и контейнеры для пищевых продуктов. В табл. 1 представлена обобщенная информация о рассматриваемых компаниях.

Таблица 1

Компании-производители продукции из мицелия

Название компании/стартапа	Страна	Продукт	Бизнес-модель	Биоразлагаемость продукта	Особенность ведения бизнеса
<u>Ecovative design</u> [17]	США	Технологии	B2B, выдача лицензий на свои технологии	–	Продажа лицензий технологии и создание сообщества
<u>Mylo</u> [18, 19]	США	Альтернативная кожа на биооснове	B2B, продвигает товары в сектор B2C	–	Веган-френдли, устойчивый бизнес Сотрудничество с крупными брендами (adidas, Stella McCartney)
<u>Mycoworks</u> [20]	США	Альтернативная кожа на биооснове	B2B, продвигает товары в сектор B2C	–	Устойчивый бизнес
<u>Mogu</u> [21]	Италия	Акустические плиты; Строительные материалы	B2B, B2C	+	Использование принципов экономики замкнутого цикла [32]
<u>Mycotech</u> [22]	Индонезия	Технологии, исследования; Альтернативная кожа на биооснове	B2B, лицензирование	–	Устойчивый бизнес, Использование принципов экономики замкнутого цикла [33]

Mycotex [23]	Нидерланды	Одежда из мицелия	B2B	+	Компостируемый материал
Magical Mushroom Company [26]	Англия	Упаковка из мицелия	B2B, B2C	+	Использование принципов экономики замкнутого цикла, используется технология Ecovative design [17]
Mushroom Packaging [27]	США	Упаковка из мицелия	B2B	+	Использование принципов экономики замкнутого цикла, используется технология Ecovative design [17]
Mycocrete [28]	Испания	Композитный материал (бетон+мицелий)	Start-up, B2B	-	Продукт может быть использован для очистки окружающей среды от загрязнения
PuriFying [29]	Бельгия	Композиционный материал на основе мицелия, выросшего на окурках сигарет (упаковка, мебель, пепельницы)	Start-up, B2C	-	Использование принципов экономики замкнутого цикла
Mycellium.co [31]	Египет	Композиционный материал из мицелия и соломы (изоляционные панели, контейнеры)	Start-up B2C	-	Эко-френдли продукция

Приведенная таблица иллюстрирует основную информацию о рассматриваемых компаниях и стартапах, занимающихся созданием различных товаров из мицелия. География компаний показывает, что в основном бизнес, основанный на производстве материалов из мицелия, популярен в США – 4 из 11 компаний базируются именно в этой стране. Кроме того, компания Ecovative design [17] занимается разработкой и продажей технологий производства различных продуктов из мицелия, стремясь к B2B сотрудничеству. Таким образом, оказывается значительное влияние на рост количества предпринимателей, использующих мицелий как сырье, в США.

Другие рассмотренные компании базируются в развитых странах Европейского Союза. Однако согласно проведенному обзору, как правило, выступают в качестве единственного представителя продуктов из мицелия в своей стране. Бизнес на основе мицелия также появляется и в развивающихся странах - примером является Mycotech из Индонезии [22]. Так же, как и Ecovative design [17] основной целью компании является создание и распространение технологий использования мицелия.

Кроме того, зарождаются небольшие стартапы, использующие грибы для переработки различных отходов и создания композитного материала из полученной однородной смеси мицелия и отхода.

В бизнесе мицелий рассматривается в качестве альтернативы искусственной и натуральной коже и как более экологичный вариант упаковки (замена пластику). Актуальность применения мицелия для создания одежды обосновывается ростом населения планеты и обострения проблемы fast-fashion.

Описание моделей продаж компаний и стартапов

Из рассмотренных компаний и стартапов большинство использует модель B2B, стараясь выстроить партнерство с крупными фирмами и заказчиками. Примером является сотрудничество между компаниями Everyday Oil и Mushroom packaging. Первая компания является косметическим брендом, стремящимся внедрять экологические инициативы и создать “зеленый” бизнес. Так, традиционную пластиковую упаковку компания заменила на упаковочный материал из мицелия от Mushroom packaging [25, 27].

Другой яркий пример развития B2B сотрудничества - компания Mylo. Их продукт - кожа из мицелия - завоевала внимание крупных брендов Adidas и Stella McCartney, в связи со стремлением брендов сделать свой бизнес более экологичным. В результате кожа из мицелия выступила ведущим материалом в одной из коллекций одежды Stella McCartney [19]. Компании из европейских стран также нацелены на модель работы в формате B2B, однако, в отличие американских компаний, в настоящий момент данные о сотрудничестве с крупными брендами отсутствуют. Тем не менее, продукция из мицелия довольно популярна в Европе, и в основном окупается за счет контрактов с локальными брендами, компаниями и производителями [21, 23, 26, 28].

B2C-модель среди производителей товаров из мицелия встречается редко. Однозначно заявляют о возможности продажи товаров физическим лицам компании: Magical Mushroom Company [26] и Mogu [21]. Так, приобрести тестовый набор упаковки от Magical Mushroom Company можно за 10 фунтов, а подарочную эко-коробку - за 5.20 фунтов [26]. Кроме того, ассортимент компании постепенно расширяется. Mogu предлагает возможность заказать тестовый набор интерьерных и строительных материалов из мицелия за 95 евро [21].

Mylo [19] и Mycoworks [20], компании из США, стремятся к развитию в B2C-сотрудничество через B2B, создавая товары из альтернативной кожи вместе с различными брендами. Разрабатываемую продукцию планируется реализовывать вместе с партнерами для физических лиц, однако на данный момент разработаны только прототипы, без анонсирования цены. Третьим вариантом бизнес-модели является усовершенствованный B2B вариант - в данном случае, компании продают лицензию на использование разработанной технологии производства продукции из мицелия. Примерами являются Ecovative design [17] в США и Mycotech [22] в Индонезии. Обе компании реализуют научно-технологическую деятельность, выводят штаммы грибов, совершенствуют их и в дальнейшем создают технологию производства той или иной продукции из мицелия. Ecovative design стремится создать сообщество предпринимателей, ориентированных на производство из мицелия в связи с осознанием экологичности и перспективности мицелия.

На основе проведенного анализа составлена схема (рис. 2), представляющая распределение основных компаний по вариантам организации бизнеса.

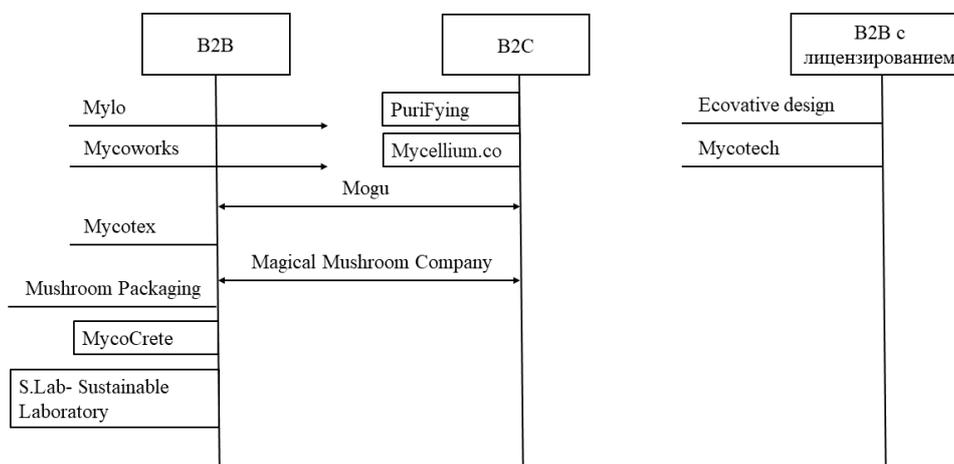


Рис. 2. Распределение компаний по моделям организации бизнеса

На рис. 2 стрелками обозначены стремление в B2C сектор для Mylo [19], Mycoworks [20] и принадлежность к B2B и B2C для Mogu [21] и Magical Mushroom Company [26]. В прямоугольниках отображены стартапы [28, 29, 31].

Реализация концепции экономики замкнутого цикла компаниями, производящими продукцию из мицелия

Области зеленой экономики, экономики замкнутого цикла и биоэкономики являются смежными и популярными в изучении устойчивого развития на макроуровне в сферах политики, научных исследований и бизнеса. В совокупности они формируют термин “тройной экономики” [34]. В свою очередь, зеленая экономика обеспечивает стабильное и устойчивое благосостояние общества за счет сокращения использования полезных ископаемых и применения возобновляемых источников энергии, биомассы и сырья [35].

Согласно принципам биоэкономики необходим переход к оптимальному использованию возобновляемых биологических ресурсов. Это осуществляется за счет устойчивых систем первичного производства и переработки, которые могут производить больше продукции на биологической основе с меньшими затратами и меньшим воздействием на окружающую среду. Этот подход полностью применим к биокompозитам из мицелия.

Концепцию “тройной экономики” применительно к биокompозитам из мицелия, можно представить с помощью адаптированной диаграммы Венна, представленной на рис. 3.



Рис. 3. Диаграмме Венна применительно к концепции “трех экономик” в контексте биокомпозитов из мицелия [35]

Биокомпозиты, как можно увидеть на рисунке, существуют на стыке трех экономик, тем самым подчеркивается актуальность и применимость мицелия в контексте достижения устойчивого развития.

Как можно увидеть из табл. 1, основной особенностью компаний, производящих продукты из мицелия, является фокус на внедрение принципов экономики замкнутого цикла. Так, компания *Mogu* [21] использует в качестве исходного сырья только остатки других процессов, придавая новую ценность не используемым ресурсам благодаря действию грибкового мицелия. Компания использует процессы, оказывающие минимальное воздействие на окружающую среду, и создает функциональные продукты с долговечным и устойчивым жизненным циклом.

Magical Mushroom Company [26] подчеркивает применением принципа *upcycling*, а также свою приверженность биомимикрии. В процессе промышленного выращивания мицелия компания воссоздает условия роста грибов в условиях леса. *Magical Mushroom Company* [26] тесно сотрудничает с местными фермами, используя их отходы производства конопли, кукурузы и древесины как сырье для выращивания мицелия. Таким образом, они реализуют вторичное использование отходов агропромышленного комплекса, создавая из них прочную упаковку для товаров крупных брендов (*Lush*, *Seedlip*).

Неординарным решением выступает идея *PuriFying* [29] создавать композитный материал из мицелия посредством переработки мицелием окурков сигарет. Пример этой компании иллюстрирует объединение переработки трудно утилизируемого отхода и получение удобного и популярного продукта, с повышенной добавленной стоимостью.

Компания *Mycotech* [22] подчеркивает, что ее продукты - альтернативная кожа и строительные панели из мицелия - в конце своего жизненного цикла компостируются и используются в качестве удобрения для дальнейшего процесса выращивания мицелия и создания нового продукта. Кроме того, строительные плиты могут быть использованы повторно для создания мозаичных панелей.

Обобщая проведенный анализ можно предложить схему, отражающую встраивание бизнеса, основанного на производстве товаров из мицелия, в рамочную концепцию экономики замкнутого цикла (рис. 4).

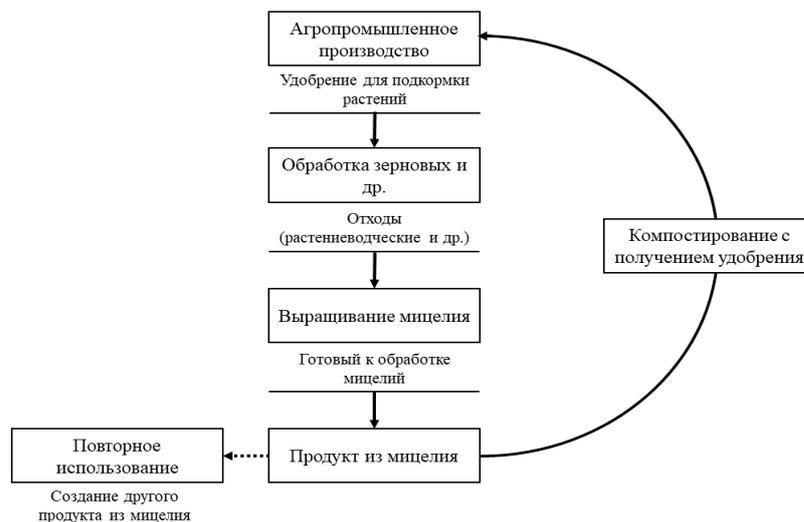


Рис. 4. Концепция экономики замкнутого цикла применительно к производству продукции из мицелия

Ключевыми для реализации подобной схемы являются несколько факторов: создание цепочки ответственных поставщиков и производителей, взаимодействующих между друг другом, и реализация отдельного сбора отходов. Тесное сотрудничество предпринимателей обеспечит бесперебойную поставку сырья и позволит приблизиться к устойчивому бизнесу. Отсутствие отдельного сбора приведет к разрушению всей концепции экономики замкнутого цикла в рассматриваемом случае, так как получаемый продукт не будет перерабатываться, но будет складироваться на свалках и терять свою потенциальную дополнительную ценность.

Кроме того, в рассматриваемой модели возможно повторное использование продуктов из мицелия, что доказано опытом рассмотренных компаний. Повторное использование может заключаться как в создании строительных материалов, так и арт-объектов, направленных на развитие экологического сознания населения.

Биоразлагаемость продукции из мицелия

Материал считается биоразлагаемым, если он полностью разрушается в результате одной лишь биологической активности. Согласно международным стандартам, биоразлагаемые материалы должны полностью разлагаться под действием бактерий и микроорганизмов с образованием CO_2 , H_2O и биомассы в качестве конечных продуктов в течение шести месяцев в условиях компостирования [36].

Продукция из мицелия, в связи с естественными свойствами мицелия, обладает потенциальной биоразлагаемостью. Наличие дополнительных компонентов в составе биокомпозита может сказаться на свойстве биоразлагаемости конечного продукта. Отсюда возникает необходимость проверки свойства биоразложения конечной продукции из биокомпозитов, содержащих мицелий. В связи с остро стоящей проблемой пластикового загрязнения, биоразлагаемость рассматривается как перспективное свойство материалов и способ решения глобальной проблемы пластиков [37]. Как показал анализ компаний, применение мицелия в основном направлено на создание композитных материалов, с помощью которых можно производить упаковку, строительные материалы нужных формы и характеристик. Из 12 рассмотренных компаний, 5 обладают необходимыми сертификатами, доказывающими биоразлагаемость их продукции. Производители подчеркивают биоразлагаемость своей продукции даже в условиях домашнего процесса компостирования в срок не более 45 дней. Свойство биоразложения позиционируется как важная экологическая характеристика товара, его конкурентное преимущество наравне с устойчивым подходом к цепочкам поставок и процессу производства.

На рис. 5 изображены пример упаковки из мицелия с призывом к переработке с помощью компостирования и процесс разложения мицелия за 4 недели [17].



Рис. 5. Примеры упаковки из мицелия [17]

Из рассмотренных вариантов товаров из мицелия, не обладает биоразлагаемостью только альтернативная кожа в связи с особенностями ее производства. Производя такой товар, компании делают упор на устойчивое развитие. Так, производители стремятся снизить воздействие на окружающую среду в ходе производства альтернативной кожи, сделать ее как можно более долговечной и применимой к повторному использованию в контексте экономики замкнутого цикла.

Заключение

Глобальная стратегия устойчивого развития направлена на снижение потребления невозобновляемых природных материалов путем замены их биологическими стабильными материалами, которые могут противостоять традиционным процессам линейной модели экономики. Применение принципов биомимикрии завоевало признание в мировом сообществе. Именно исследования в сферах разработки, производства и реализации биокompозитов из мицелия показывают перспективные возможности для выхода данной продукции на рынок взамен синтетическим полимерам на основе нефтепродуктов. Результаты работы подтверждают положительную заинтересованность компаний в разработке и реализации продукции, произведенной на биологической основе, а именно из мицелия. Многие международные крупные компании и ритейлеры готовы сотрудничать с производителями продукции из мицелия, благодаря ее экологичности и возможности совершенствования устойчивого развития компаний. Данная бизнес-ориентация обеспечивает переход к более ресурсоэффективным технологиям. Рассмотренный опыт реализации проектов показывает основные тенденции развития бизнеса, производящего биокompозиты из мицелия, ориентированного на экономику замкнутого цикла, устойчивое развитие (с упором на ответственные поставки) и биоразлагаемость продукции. В случае альтернативной кожи из мицелия большой фокус делается на vegan-friendly направление и продление срока использования одежды и другой продукции из такой кожи. Применение мицелия для создания строительных материалов, упаковки, мебели и элементов интерьера полностью соответствует предложенной схеме реализации экономики замкнутого цикла.

Внедрение производства продукции из мицелия должно быть сопряжено с разработкой инфраструктуры и реализацией необходимых технологий раздельного сбора и переработки отходов посредством компостирования. Также необходимым является получение сертификатов качества, подтверждающих биоразложение продукции из мицелия посредством компостирования.

Таким образом, применение мицелия в качестве основы для биокompозитов и продукции разного профиля обладает большими перспективами роста и развития в связи с экологичностью материала, реализуемостью технологий производства, положительным международным опытом и необходимостью развития тенденций «зеленых технологий» и «зеленого бизнеса» в России.

Литература

1. Новости ООН. Пластик – тройная угроза планетарного масштаба [Электронный ресурс] URL: <https://news.un.org/ru/story/2021/09/1409292> (дата обращения: 20.03.2022).
2. *Elsacker E. et al.* A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites //Science of The Total Environment. 2020. Т. 725. С. 138431.
3. *Ongpeng M. C. et al.* Using Waste in Producing Bio-Composite Mycelium Bricks //Applied Sciences. 2020. Т. 10. – №. 15. С. 5303.

4. *Abhijith R., Ashok A., Rejeesh C. R.* Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review //Materials today: proceedings. 2018. Т. 5. №. 1. С. 2139–2145.
5. *Stahel W. R.* The circular economy //Nature. 2016. Т. 531. №. 7595. С. 435–438.
6. *Ryen E. G. et al.* Ecological foraging models as inspiration for optimized recycling systems in the circular economy //Resources, Conservation and Recycling. –2018. Т. 135. С. 48-57.
7. *Tate W. L. et al.* Seeing the forest and not the trees: Learning from nature’s circular economy //Resources, Conservation and Recycling. 2019. Т. 149. С. 115-129.
8. *Girmay Z., Gorems W., Birhanu G., Zewdie S.* Growth and yield performance of *Pleurotus ostreatus* (Jacq. Fr.) Kumm (oyster mushroom) on different substrates //Amb Express. 2016. Т. 6. №. 1. С. 1–7.
9. *Butu A. et al.* Mycelium-based Materials for the Ecodesign of Bioeconomy // Dig J Nanomater Biostruct. 2020. Т. 15. №. 4. С. 1129–1140.
10. *Jones M. et al.* Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review // Materials & Design. 2020. Т. 187. С. 108397.
11. *Смогунов В. В., Вольников М. И., Кузнецов Н. С.* Гетерология технологий утилизации отходов // Нива Поволжья. 2020. №. 4 (57). С. 140–146.
12. *Deepalakshmi K. et al.* Toxicological assessment of *Pleurotus ostreatus* in Sprague Dawley rats //International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases. 2014. Т. 4. №. 3. С. 139.
13. ASTM International [Электронный ресурс] URL: <https://www.astm.org> (дата обращения: 20.03.2022).
14. *Aniela Hoitink creates dress from mushroom mycelium* [Электронный ресурс] URL: <https://www.dezeen.com/2016/04/01/aniela-hoitink-neffa-dress-mushroom-mycelium-textile-materials-fashion/> (дата обращения: 20.03.2022).
15. *Company New Heroes in collaboration with Krown.bio creates mycelium pavilion grown out of agricultural waste* [Электронный ресурс] URL: <https://archello.com/news/company-new-heroes-in-collaboration-with-krownbio-creates-mycelium-pavilion-grown-out-of-agricultural-waste> (дата обращения: 20.03.2022).
16. *GQ. Стиль* [Электронный ресурс] URL: <https://www.gq.ru/style/skoro-my-nachnem-pokupat-obuv-odezhdu-i-kosmetiku-iz-gribov> (дата обращения: 20.03.2022).
17. *Econative design* [Электронный ресурс] URL: <https://ecovative.com> (дата обращения: 22.03.2022).
18. *Mylo* [Электронный ресурс] URL: <https://boltthreads.com/technology/mylo/> (дата обращения: 22.03.2022).
19. *Mylo Unleather* [Электронный ресурс] URL: <https://www.mylo-unleather.com> (дата обращения: 22.03.2022).
20. *Mycoworks* [Электронный ресурс] URL: <https://www.mycoworks.com> (дата обращения: 22.03.2022).
21. *Mogu* [Электронный ресурс] URL: <https://mogu.bio> (дата обращения: 22.03.2022).
22. *Mycotech Lab* [Электронный ресурс] -URL: <https://mycl.bio/> (дата обращения: 22.03.2022).
23. *Mycotex* [Электронный ресурс] URL: <https://www.mycotex.nl> (дата обращения: 22.03.2022).
24. *When mushrooms go in the lab: growing design* [Электронный ресурс] URL:<https://medium.com/@stonev/when-mushrooms-go-in-the-lab-growing-design-882bff633aa8> (дата обращения: 23.03.2022).
25. *Everyday Oil* [Электронный ресурс] URL: <https://everydayoil.com/> (дата обращения: 23.03.2022).
26. *Magical Mushroom Company* [Электронный ресурс] URL: <https://www.magicalmushroom.com/> (дата обращения: 23.03.2022).
27. *Mushroom Packaging* [Электронный ресурс] URL: <https://mushroompackaging.com/> (дата обращения: 23.03.2022).
28. *Mycocrete* [Электронный ресурс] URL: <https://www.mycocrete.com/> (дата обращения: 23.03.2022).
29. *TEDxBrussels* [Электронный ресурс] URL: <https://www.ted.com/tedx/events/47422> (дата обращения: 23.03.2022).
30. *Fungi Perfecti* [Электронный ресурс] URL: <https://fungi.com> (дата обращения: 23.03.2022).
31. *Mycellium.co* [Электронный ресурс] URL: <https://www.mycellium.co> (дата обращения: 23.03.2022).
32. *Mogu. Resilient Floors* [Электронный ресурс]. URL: <https://mogu.bio/flooring/> (дата обращения: 23.03.2022).
33. *Mycotech Lab. Sustainability* [Электронный ресурс]. URL: <https://mycl.bio/sustainability> (дата обращения: 23.03.2022).
34. *Kardung M. et al.* Development of the circular bioeconomy: Drivers and indicators //Sustainability. 2021. Т. 13. №. 1. С. 413.
35. *D'amato D., Korhonen J.* Integrating the green economy, circular economy and bioeconomy in a strategic sustainability framework //Ecological Economics. 2021. Т. 188. С. 107143.
36. *Rudnik E.* Biodegradability testing of compostable polymer materials under laboratory conditions //Compostable polymer materials. – Boston: Elsevier, 2019. С. 163-237.
37. *Klein F. et al.* Influencing factors for the purchase intention of consumers choosing bioplastic products in Germany //Sustainable Production and Consumption. 2019. Т. 19. С. 33-43.

References

1. Novosti OON. Plastik – trojnaya ugroza planetarnogo masshtaba [Electronic resource] URL: <https://news.un.org/ru/story/2021/09/1409292> (date of application: 20.03.2022).
2. Elsacker E. et al. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 725. – P. 138431.
3. Ongpeng M. C. et al. Using Waste in Producing Bio-Composite Mycelium Bricks // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – №. 15. – P. 5303.
4. Abhijith R., Ashok A., Rejeesh C. R. Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review // *Materials today: proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – №. 1. – P. 2139–2145.
5. Stahel W. R. The circular economy // *Nature*. – 2016. – Vol. 531. – №. 7595. – P. 435–438.
6. Ryen E. G. et al. Ecological foraging models as inspiration for optimized recycling systems in the circular economy // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2018. – Vol. 135. – P. 48-57.
7. Tate W. L. et al. Seeing the forest and not the trees: Learning from nature’s circular economy // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2019. – Vol. 149. – P. 115-129.
8. Girmay Z., Gorems W., Birhanu G., Zewdie S. Growth and yield performance of *Pleurotus ostreatus* (Jacq. Fr.) Kumm (oyster mushroom) on different substrates // *Amb Express*. – 2016. – Vol. 6. – №. 1. – P. 1–7.
9. Butu A. et al. Mycelium-based Materials for the Ecodesign of Bioeconomy // *Dig J Nanomater Biostruct*. – 2020. – Vol. 15. – №. 4. – P. 1129–1140.
10. Jones M. et al. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 187. – P. 108397.
11. Smogunov V. V., Vol'nikov M. I., Kuznecov N. S. Geterologiya tekhnologij utilizacii othodov // *Niva Povolzh'ya*. – 2020. – №. 4 (57). – P. 140–146.
12. Deepalakshmi K. et al. Toxicological assessment of *Pleurotus ostreatus* in Sprague Dawley rats // *International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases*. – 2014. – Vol. 4. – №. 3. – P. 139.
13. ASTM International [Electronic resource] URL: <https://www.astm.org> (date of application: 20.03.2022).
14. Aniela Hoitink creates dress from mushroom mycelium [Electronic resource] URL: <https://www.dezeen.com/2016/04/01/aniela-hoitink-neffa-dress-mushroom-mycelium-textile-materials-fashion/> (date of application: 20.03.2022).
15. Company New Heroes in collaboration with Krown.bio creates mycelium pavilion grown out of agricultural waste [Electronic resource] URL: <https://archello.com/news/company-new-heroes-in-collaboration-with-krownbio-creates-mycelium-pavilion-grown-out-of-agricultural-waste> (date of application: 20.03.2022).
16. GQ. Stil' [Electronic resource] URL: <https://www.gq.ru/style/skoro-my-nachnem-pokupat-obuv-odezhdu-i-kosmetiku-iz-gribov> (date of application: 20.03.2022).
17. Econative design [Electronic resource] URL: <https://ecovative.com> (дата обращения: 22.03.2022).
18. Mylo [Electronic resource] URL: <https://boltthreads.com/technology/mylo/> (date of application: 20.03.2022).
19. Mylo Unleather [Electronic resource] URL: <https://www.mylo-unleather.com> (date of application: 20.03.2022).
20. MycoWorks [Electronic resource] URL: <https://www.mycoworks.com> (date of application: 20.03.2022).
21. Mogu [Electronic resource] URL: <https://mogu.bio> (date of application: 20.03.2022).
22. Mycotech Lab [Electronic resource] -URL: <https://mycl.bio/> (date of application: 22.03.2022).
23. Mycotex [Electronic resource] URL: <https://www.mycotex.nl> (date of application: 22.03.2022).
24. When mushrooms go in the lab: growing design [Electronic resource] URL: <https://medium.com/@stonev/when-mushrooms-go-in-the-lab-growing-design-882bff633aa8> (date of application: 22.03.2022).
25. Everyday Oil [Electronic resource] URL: <https://everydayoil.com/> (date of application: 22.03.2022).
26. Magical Mushroom Company [Electronic resource] URL: <https://www.magicalmushroom.com/> (date of application: 22.03.2022).
27. Mushroom Packaging [Electronic resource] URL: <https://mushroompackaging.com/> (date of application: 22.03.2022).
28. MycoCrete [Electronic resource] URL: <https://www.mycocrete.com/> (date of application: 22.03.2022).
29. TEDxBussels [Electronic resource] URL: <https://www.ted.com/tedx/events/47422> (date of application: 22.03.2022).
30. Fungi Perfecti [Electronic resource] URL: <https://fungi.com> (date of application: 22.03.2022).
31. Mycellium.co [Electronic resource] URL: <https://www.mycellium.co> (date of application: 23.03.2022).
32. Mogu. Resilient Floors [Electronic resource]. URL: <https://mogu.bio/flooring/> (date of application: 23.03.2022).
33. Mycotech Lab. Sustainability [Electronic resource]. URL: <https://mycl.bio/sustainability> (date of application: 23.03.2022).
34. Kardung M. et al. Development of the circular bioeconomy: Drivers and indicators // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – №. 1. – P. 413.
35. D'amato D., Korhonen J. Integrating the green economy, circular economy and bioeconomy in a strategic sustainability framework // *Ecological Economics*. – 2021. – Vol. 188. – P. 107143.

36. Rudnik E. Biodegradability testing of compostable polymer materials under laboratory conditions // *Compostable polymer materials*. – Boston: Elsevier, 2019. – P. 163-237.
37. Klein F. et al. Influencing factors for the purchase intention of consumers choosing bioplastic products in Germany // *Sustainable Production and Consumption*. – 2019. – Vol. 19. – P. 33-43.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022
Принята к публикации 14.09.2022

Received 19.04.2022
Accepted for publication 14.09.2022