

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-31-43>

Поступила 08.11.2023

Поступила после рецензирования 20.02.2024

Принята в печать 26.02.2024

© Кузнецова А. П., Аль-Шехадат Р. И., 2024



<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

# ПИЩЕВЫЕ ОТХОДЫ — СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИГИДРОКСИАЛКАНОАТОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Кузнецова А. П.\*, Аль-Шехадат Р. И.

Факультет биотехнологий (BioTech), Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

пищевые отходы,  
биоразлагаемые  
полимеры,  
полигидрокси-  
алканоаты,  
отходы фруктов,  
биоразлагаемая  
упаковка

Обострение проблемы загрязнения окружающей среды пластиком стимулирует поиск не только наиболее перспективного биоразлагаемого полимера, но и оптимального сырья для его производства. Полигидроксисалканоаты (ПГА) — биоразлагаемые полимеры, обладающие физико-механическими свойствами близкими к традиционным пластикам, рассматриваются как потенциальное решение данной проблемы. Производство ПГА может быть реализовано согласно принципам биоэкономики замкнутого цикла путем биотехнологической переработки вторичного сырья с получением продукта с добавочной стоимостью. Однако важной составляющей расширения производства ПГА является необходимость обнаружения наиболее перспективного вторичного сырья для его производства. Проведен анализ рынка ПГА в России и мире, в качестве основополагающего фактора роста производства ПГА выделяется спрос в упаковочной, пищевой промышленности, биомедицине и агропромышленности. Библиографический анализ с применением схемы PRISMA и программы VOSviewer позволил выявить три основных направления исследований ПГА: поиск оптимального вторичного сырья среди пищевых отходов; анализ вызовов при производстве ПГА; изучение экологических и экономических эффектов от внедрения ПГА. Определены перспективные виды вторичного сырья: отходы производства растительных масел, отходы переработки фруктов и овощей, молочная сыворотка, отходы сахарной и крахмальной промышленности, отработанная кофейная гуща, экстрагированные из нее кофейные масла. Выявлены преимущества и недостатки использования вторичного сырья, возможности совершенствования способов его применения в производстве ПГА, а также установлены основные штаммы-продуценты. Для оптимизации стоимости и процессов производства ПГА требуются дальнейшие исследования пищевых отходов, направленные на разработку подходов к увеличению выхода полимера, в том числе путем применения процессов подготовки вторичного сырья. Также для перечисленных целей необходим поиск наиболее продуктивных штаммов, синтезирующих ПГА.

Received 08.11.2023

Accepted in revised 20.02.2024

Accepted for publication 26.02.2024

© Kuznetsova A. P., Al-Shekhadat R. I., 2024

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

# FOOD WASTE AS A RAW MATERIAL FOR PRODUCTION OF POLYHYDROXYALKANOATES: STATE AND PROSPECTS

Anna P. Kuznetsova\*, Ruslan I. Al-Shekhadat

Faculty of Biotechnologies (BioTech), ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

## KEY WORDS:

food waste,  
biodegradable  
polymers,  
polyhydroxyalkanoates,  
fruit waste,  
biodegradable  
packaging

## ABSTRACT

The growing problem of environmental pollution by plastic leads to the search not only for the most promising biodegradable polymer, but also for optimal raw materials for its production. Polyhydroxyalkanoates (PHA) — biodegradable polymers with physical and mechanical properties close to traditional plastics — are considered a potential solution to this problem. The production of PHA can be organized according to the principles of circular bioeconomy through biotechnological processing of secondary raw materials to produce a product with added value. However, an important component of the expansion of PHA production is the need to find the most promising secondary raw materials for its production. The PHA market in Russia and the global market have been analyzed, highlighting the demand in the packaging and food industries, biomedicine and agro-industry as the fundamental factor for the growth of PHA production. Bibliographic analysis using the PRISMA scheme and VOSviewer program allowed identifying three main directions of PHA research: search for optimal secondary raw materials among food waste, analysis of challenges in PHA production, and the ecological and economic effects of its implementation. Promising types of secondary raw materials have been revealed: vegetable oil production waste, fruit and vegetable processing waste, dairy whey, sugar and starch industry waste, spent coffee grounds and coffee oils extracted from them. Advantages and disadvantages of using secondary raw materials, options for improving their use in the production of PHA, and the main strains-producers were determined. To optimize the cost and processes of PHA production, further studies of food waste are required, aimed at developing approaches to increase the polymer yield, including through the use of secondary raw material preparation processes, and the search for the most productive strains synthesizing PHA.

## 1. Введение

Полигидроксисалканоаты (ПГА) — биоразлагаемые полимеры, синтезируемые микроорганизмами. Значительным преимуществом этого семейства полимеров выступают аналогичные традиционным пластикам физико-механические свойства [1]. Кроме того, производство ПГА может полностью соответствовать принципам биоэкономики замкнутого цикла. Так, в качестве источника углерода и питательных веществ для клеток, производящих ПГА, применяются бытовые и промышленные отходы. А использованная продукция

из ПГА может быть переработана вместе с органическими отходами посредством компостирования. Такой подход повышает ресурсоэффективность, вносит вклад в систему управления отходами, а главное, снижает общую стоимость производства ПГА [2].

Ожидается, что объем рынка полигидроксисалканоатов вырастет с 32,14 килотонн в 2023 году до 92,41 килотонн к 2028 году при темпе роста в 23,52% в течение прогнозного периода (2023–2028 гг.). В денежном эквиваленте прогнозируется рост с 93 миллионов долларов в 2023 году до 195 миллионов в 2028 году при темпе роста 15,9% [3].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кузнецова, А. П., Аль-Шехадат, Р. И. (2024). Пищевые отходы — сырье для получения биоразлагаемых полигидроксисалканоатов: состояние и перспективы. *Пищевые системы*, 7(1), 31-43. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-31-43>

FOR CITATION: Kuznetsova, A. P., Al-Shekhadat, R. I. (2024). Food waste as a raw material for production of polyhydroxyalkanoates: State and prospects. *Food Systems*, 7(1), 31-43. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-31-43>

В первую очередь, это обусловлено усилением государственного контроля и разработкой нормативных актов, нацеленных на уменьшение потребления одноразовых изделий из пластика, а также на борьбу с проблемами, связанными с накоплением и переработкой пластиковых отходов.

Основным фактором, стимулирующим рост рынка полигидроксисилканов, является растущий спрос на биоразлагаемые материалы в упаковочной и пищевой промышленности, а также в биомедицине и агропромышленности. Немаловажно и появление новых и экономически эффективных видов сырья для производства ПГА, таких, как отходы пищевой промышленности [3,4].

Ключевыми компаниями-производителями ПГА являются [4]:

- Danimer Scientific (США),
- Shenzhen Ecomann Biotechnology Co, Ltd. (Китай),
- Kaneka Corporation (Япония),
- RWDC Industries (Сингапур),
- Newlight Technologies LLC (США),
- TianAn Biologic Materials Co., Ltd. (Китай),
- Biomer (Германия).

На территории России рынок биоразлагаемых полимеров развивается медленнее, однако представлен разнообразными видами таких полимеров, включая полилактид и полигидроксисилканаты; преимущественно рынок состоит из биоразлагаемых растительных композиций [5].

Ранее, в 2013 году правительством был утвержден план мероприятий "Развитие биотехнологий и генной инженерии", рассчитанный на период до 2020 года и включающий в себя расширение рынка биополимеров. Однако в настоящий момент в России представлено крайне малое количество крупных функционирующих предприятий. Большинство биополимеров производятся небольшими инициативными предприятиями и стартапами.

Несколько проектов, инициированные в сотрудничестве с иностранными компаниями ("Ренова" в сотрудничестве с голландской компанией Purac, ТАИФ и с итальянской фирмой Bio-on), не дошли до стадии реализации.

Однако, согласно пресс-службе Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, иницируются новые проекты. Так, компания "Рустарк" в особой экономической зоне «Липецк» планирует развернуть инновационный производственный комплекс по переработке пшеничного сырья на крахмалы и биополимеры (полилактид). Заявляется выход на получение биополимеров к 2024 году [5].

Сельскохозяйственный холдинг «Сибagro» также рассматривает возможность производства полилактида из перерабатываемой холдингом пшеницы. Прогнозируется объем производства около 30 тыс. тонн полилактида ежегодно.

Несмотря на постепенное развитие производственных мощностей, комплексный анализ рынка и производства в настоящий момент не проведен. Отдельные аналитические работы отмечают рост спроса на полилактид, с целью производства пищевой упаковки. Информационно-аналитический центр Рупес в своих исследованиях подчеркивает низкую вероятность масштабного развития производства биоразлагаемых полимеров (с исключением для полилактида при условии обеспечения государственной поддержки для реализации производственных проектов). Также отмечается, что затраты на сырье в России могут быть на 50–100% выше, чем в США.

В условиях текущей политической обстановки, в связи с которой импорт биополимеров и технологий становится затруднительным, обостряется необходимость разработки технологий производства универсальных биополимеров с возможностью применения в различных областях, включая медицину и производство упаковки для продовольствия, с целью снижения зависимости крупных отраслей промышленности от импорта полимеров [6].

Полигидроксисилканаты могут выступать в качестве перспективных биополимеров для производства в России ввиду возможности значительного снижения их стоимости посредством применения в качестве исходного материала отходов пищевой промышленности.

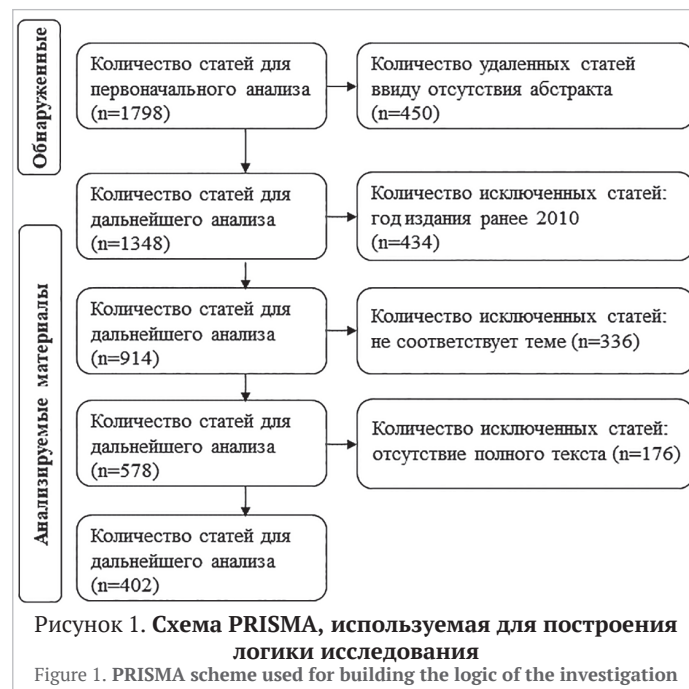
## 2. Объекты и методы

Объектами исследования выступали научные публикации мирового сообщества, представленные на английском языке. Формирование первичной выборки статей происходило из базы данных Lens Org на основе запроса, содержащего такие ключевые слова как «РНА», «polyhydroxyalkanoate» и «food waste». Перечисленные ключевые слова позволяют достаточно точно сформировать выборку научных публикаций, соответствующих тематике исследования.

Используя схему PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), изображенную на Рисунке 1, были отобраны статьи, соответствующие следующим критериям:

- год публикации: 2010–2023 (что позволяет сфокусировать анализ на современных исследованиях).
- направление исследования: полигидроксисилканаты, food science, биология, бактерии, экология, материаловедение, управление отходами, биотехнология, инженерия окружающей среды, прикладная микробиология и биотехнология, полимеры и пластмассы, управление и утилизация отходов, химия материалов, химия окружающей среды, пищевая промышленность, молекулярная биология, микробиология, биомедицинская инженерия, общее материаловедение, сельскохозяйственные и биологические науки, биохимия, генетика и молекулярная биология.

Дополнительными критериями отсеивания при формировании конечной выборки выступали такие факторы, как наличие аннотации и доступность полного текста научной публикации.



Анализ выборки проводился с применением программы VOSviewer, позволяющей провести визуальный анализ сформированной выборки, определить ключевые темы исследований и связи между ними. Цель использования VOSviewer в данной работе — выявить наиболее актуальные направления исследований в области получения полигидроксисилканов из пищевых отходов, а также наиболее перспективные виды вторичного сырья.

### 2.1. Анализ с применением VOSviewer

#### 2.1.1. Анализ первичной выборки

Целью проведения библиометрического анализа выступало выявление общих тенденций в сфере исследования биоразлагаемых материалов и их получения из пищевых отходов. Результаты анализа позволили оценить смещение исследовательских интересов в сторону конкретных пищевых отходов, а также свойств полигидроксисилканов и методов их получения.

Первоначальный анализ проводился по первой сформированной выборке (до ее обработки согласно схеме PRISMA) для выявления крупных кластеров в направлении исследования полигидроксисилканов и их производства из пищевых отходов. Полученный график представлен на Рисунке 2.

На приведенном графике явно выделены 3 кластера, что позволяет выявить три основных направления исследований ПГА. Самый крупный кластер, синий, визуализирует общее изучение ПГА (study, characteristic, experiment, microbe), его влияние на окружающую среду (environment, soil), социальные аспекты (community, china), а также появление новой экосистемы, пластисферы. Красный кластер указывает на исследования, направленные на изучение сырья для производства ПГА, выявляя наиболее перспективные источники получения полимера (food waste, waste, organic waste, vfas, lignin), а также методы получения ПГА и микроорганизмы, синтезирующие полимер (mmc (mixed microbial culture), bacillus, cupriavidus). Вопро-

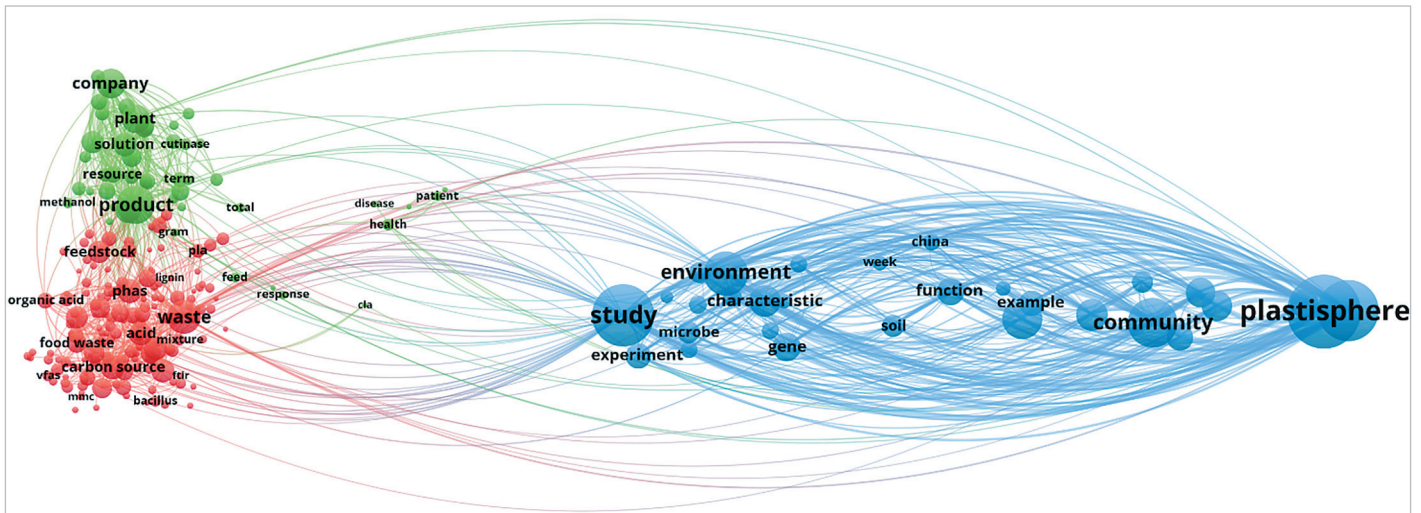


Рисунок 2. Библиометрическая карта публикаций в предметной области получения ПГА из пищевых отходов (инструментарий: VOSviewer, метод: Keyword Co-occurrence)

Figure 2. Bibliometric map of publications in the subject field of PHA production from food waste (tools: VOSviewer, method: Keyword Co-occurrence)

сы о целесообразности производства ПГА, включая экономическую выгоду, актуальные проблемы производства и качество конечного продукта, объединены в зеленый кластер.

Из графика можно сделать предположение о тесной взаимосвязи между исследованиями зеленого и красного кластеров, которые можно охарактеризовать как исследования, посвященные вопросам производства и масштабирования промышленного производства полимеров, включая аспекты экономической выгоды. В то время как синий кластер, больше связанный с общими лабораторными и социальными исследованиями, визуализирован в некотором отдалении. Таким образом, возможно предположить, что в настоящий момент исследования ПГА в большей степени направлены на лабораторные эксперименты, на изучение свойств полимера и получение оптимальных композиций, а экономические и промышленные вопросы производства полимера в крупных масштабах постепенно раскрываются в более фундаментальных исследованиях. Кроме того, в научных работах делается акцент на поиск источников углерода для получения полимера, таких как отходы производства (waste) и пищевые отходы (food waste).

Полученная визуализация также была рассмотрена с позиции распределения исследований по годам. Частота упоминания ключевых слов с 2010 по 2023 год представлена на Рисунке 3.

Рисунок 3 иллюстрирует постепенное смещение фокуса от первоначальных лабораторных исследований к практическим вопросам выбора сырья производства ПГА (waste, food waste, feedstock, vfas) и к аспектам производства полимера (plant, solution, resource, term, company). Также в последние несколько лет активно изучаются отдельные виды сырья, микробные консорциумы, пластисфера, экономика.

Следующий этап анализа включал в себя более детальное рассмотрение сформировавшихся и формирующихся тенденций исследований о получении ПГА из пищевых отходов, а также сравнение с определенными общими направлениями исследований.

#### 2.1.2. Анализ конечной выборки

Библиометрическая карта выборки научных исследований, полученной после обработки согласно представленной ранее схеме PRISMA, представлена на рисунке 4. Визуализация выборки представляет собой три крупных кластера, также очевидно некоторое смещение в сторону зеленого кластера. Наблюдается значительная конкретизация критерия объединения терминов в кластеры, в то же время, основные тенденции, выявленные на первичной выборке, остаются актуальными.

Синий кластер, сформированный из 14 терминов, продолжает отмеченное ранее направление общих, лабораторных исследований

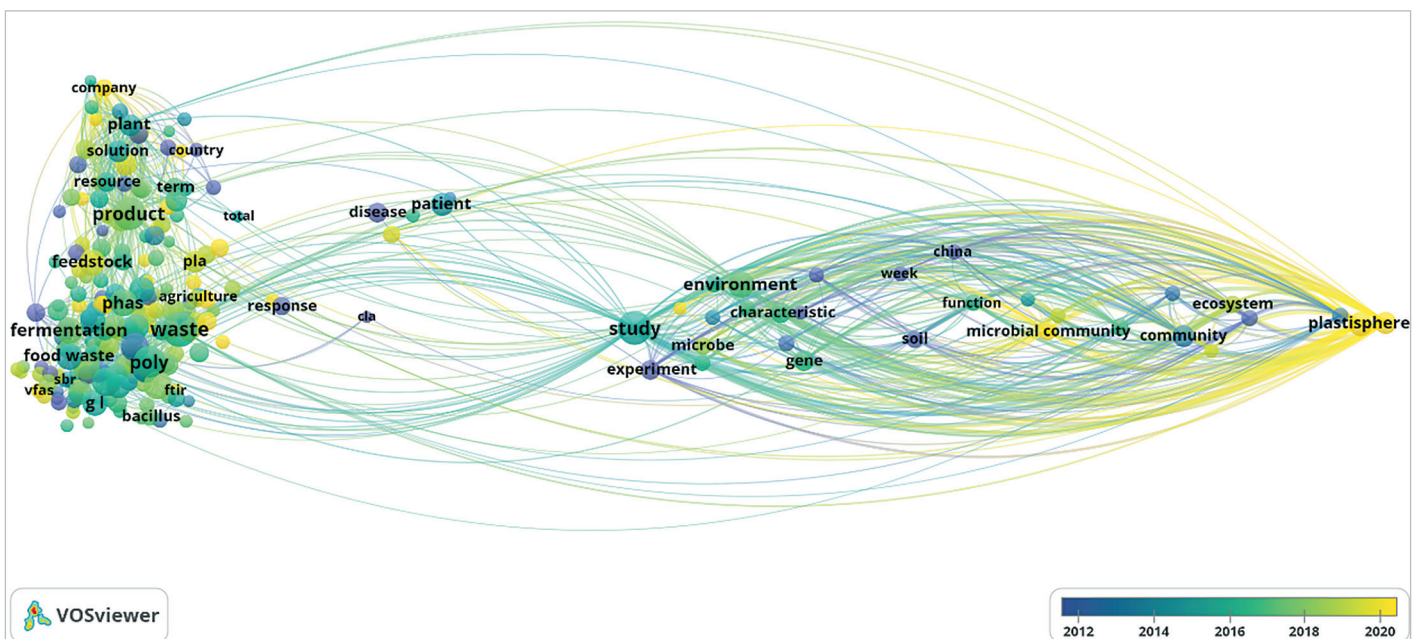


Рисунок 3. Библиометрическая карта публикаций в предметной области получения ПГА с распределением по среднему году публикаций (инструментарий: VOSviewer, метод: Keyword Co-occurrence)

Figure 3. Bibliometric map of publications in the subject field of PHA production with distribution by average year of publications (tools: VOSviewer, method: Keyword Co-occurrence)

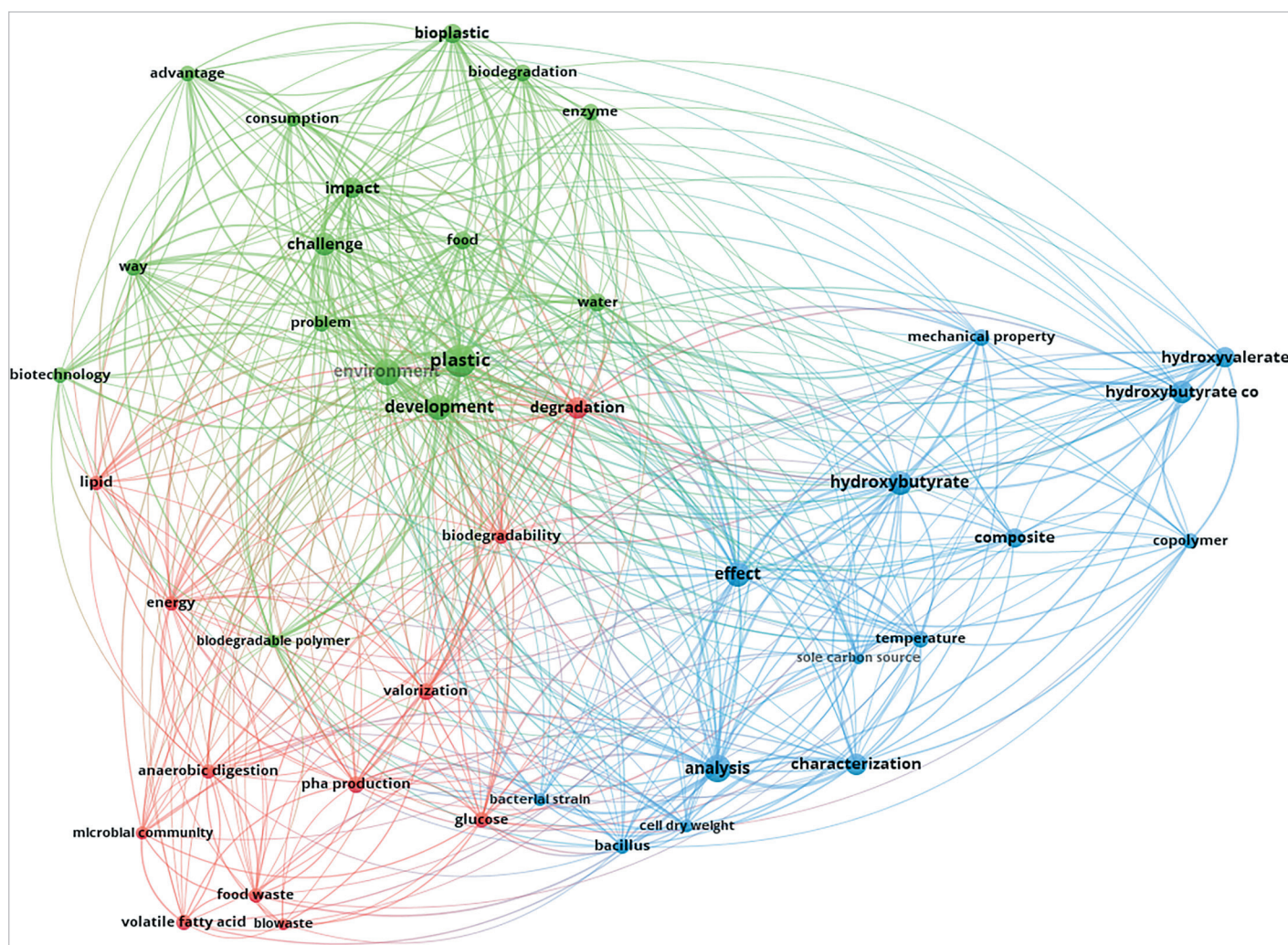


Рисунок 4. Библиометрическая карта публикаций в предметной области получения ПГА из пищевых отходов в соответствии со схемой PRISMA (инструментарий: VOSviewer, метод: Keyword Co-occurrence)

Figure 4. Bibliometric map of publications in the subject field of PHA production from food waste according to the PRISMA scheme (tools: VOSviewer, method: Keyword Co-occurrence)

получения ПГА, и благодаря визуализации возможно более точное определение фокуса внимания исследователей. Наиболее сильные связи наблюдаются у часто встречающихся терминов effect (33 повторения, сила связи 88) и analysis (38 повторений, сила связи 103), что подтверждает общую группировку терминов кластера по теме изучения и исследования полимера, его сополимеров, композитных материалов. Значительное внимание привлекает изучение возможности получения полигидроксивалерата (ПГВ) и полигидроксибутирата (ПГБ). Как основные характеристики процесса получения полимера и оценки его качеств в исследовании можно отметить такие термины как механические свойства, сухая масса клеток, единственный источник углерода, штамм бактерий (mechanical property, cell dry weight, sole carbon source, bacterial strain). Анализируя синий кластер на карте с отображением среднего года публикаций, можно отметить смещение исследований и вопросов, связанных с бактериальными штаммами (2017 г.) и сополимерами (2017 г.) к ПГБ (2018,77) и ПГВ (2018,77) и далее к механическим свойствам (2019,67).

Красный кластер, содержащий 12 терминов, как и при визуализации первичной выборки, иллюстрирует вопросы, связанные с выбором сырья для производства ПГА. Кроме того, выделены термины, характеризующие процесс производства ПГА (pha production, energy), улучшение качества сырья (anaerobic digestion) и его валоризацию (valorization). В красный кластер также включены термины, описывающие способность полимера к биоразложению (biodegradability, degradation). В красном кластере отображены не только общие термины, описывающие вторичное сырье (food waste, biowaste), но и конкретные примеры сырья, рассматриваемые в исследованиях (glucose, volatile fatty acid, lipid). Глюкоза выступает классическим сырьем для получения ПГА и позволяет получать высокие выходы полимера, но значительно увеличивает его стоимость.

Для снижения конечной стоимости полимера, в качестве перспективного сырья рассматриваются пищевые отходы, однако на карте не отображены такие пищевые отходы как: молочная сыворотка, отходы фруктов и овощей, кофейных жмых и другие. Таким образом, можно утверждать, что рассмотрение данных типов сырья находится в начальной стадии, и можно предположить, что фокус исследований пищевых отходов постепенно будет смещаться от общего изучения к выявлению конкретных типов вторичных ресурсов. Это также подтверждает Рисунок 5, где заметно движение от терминов pha production и volatile fatty acid (2016,93 и 2017,25 гг. соответственно) к glucose (2018 г.) и далее к food waste и valorization (2019,55 и 2020,40 гг. соответственно).

Тесная связь терминов красного и зеленого кластера также прослеживается в конечной выборке. Однако конкретизация выборки несколько меняет общее содержание кластера, отдавая его от экономической и производственной тематики. Зеленый кластер включает в себя 16 терминов, описывающих сложности, вызовы и эффекты, связанные с полигидроксиалканатами. По перечисленным в кластере терминам, можно предположить, что в общем ПГА видятся исследователям как перспективный экологичный полимер с рядом преимуществ, сравнимый с пластиками (plastic — 50 упоминаний).

Таким образом, визуализация с применением VOSviewer позволила выявить три основных направления научных исследований ПГА, а также их получения из пищевых отходов:

1. Исследование и изучение ПГА, лабораторное получение полимера, его сополимеров и оценка их механических свойств.
2. Пищевые отходы как сырье для получения ПГА: изучение видов, улучшение качества сырья, валоризация.
3. Вызовы и эффекты применения ПГА, производство полимера, противопоставление или сравнение с пластиками.

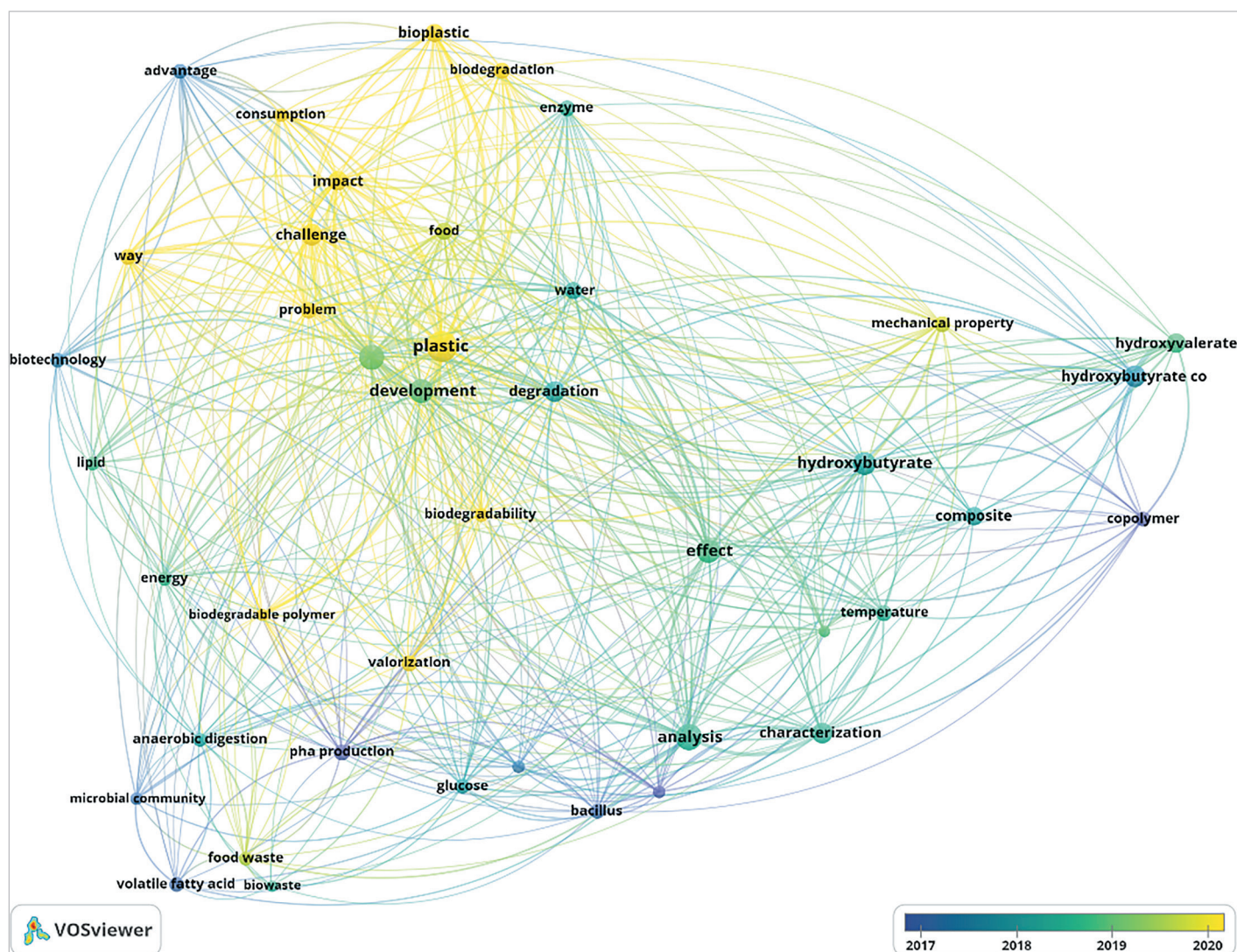


Рисунок 5. Библиометрическая карта публикаций в предметной области получения ПГА с распределением по среднему году публикаций в соответствии со схемой PRISMA (инструментарий: VOSviewer, метод: Keyword Co-occurrence)

Figure 5. Bibliometric map of publications in the subject field of PHA production with distribution by average year of publications according to the PRISMA scheme (tools: VOSviewer, method: Keyword Co-occurrence)

Для каждого из выделенных направлений исследований был проведен более детальный анализ с целью определения основных результатов, сложностей, а также перспективных видов сырья и лабораторных подходов для получения ПГА. Значительное внимание было уделено текущей ситуации с производством ПГА в России.

### 3. Отходы пищевой промышленности и агропромышленного сектора как сырье для получения ПГА

Подбор дешевого и экологически безопасного сырья для производства ПГА может обеспечить значительное снижение стоимости на конечный полимерный продукт. Кроме того, учитывая особенности биосинтеза ПГА, открываются возможности его производства с применением принципов экономики замкнутого цикла. В связи с этим, значительное внимание в качестве потенциального сырья для производства привлекают отходы пищевой и сельскохозяйственной промышленности. Предпосылками к этому выступают, в первую очередь, большое их количество, необходимость экономически выгодной переработки и доступность. Более того, специальное выращивание сырья для производства биополимеров (например, кукурузы), может оказывать негативное воздействие на экологию (фотохимический смог, эвтрофикация и закисление почв) а также демонстрировать нерациональное использование пищевых ресурсов [7].

К сырью для производства ПГА были сформулированы следующие требования [8]:

1. Сырье должно быть возобновляемой биомассой, что позволит избежать негативное воздействие на окружающую среду.

2. Стоимость сырья должна быть минимальна, что обеспечит снижение стоимости его переработки и производства конечного продукта.

3. Сырье должно быть легкодоступно для производства, что позволит снизить транспортные издержки и также уменьшить стоимость конечного продукта.

4. Сырье должно быть богато углеродом, что обеспечит более высокие степени конверсии сырья микроорганизмами в конечный продукт. В качестве сырья для производства ПГА рассматриваются не только группы отходов: сточные воды, сырой глицерин, агропромышленные отходы, отходы животноводства, пищевые отходы. Среди пищевых отходов основным сырьем для производства ПГА рассматривают:

- богатые липидами органические отходы: отработанные кулинарные масла, оливковые и подсолнечные выжимки, сточные воды масляных производств, отходы животного жира и другие;
- отходы молочной промышленности: сыворотка;
- отходы переработки фруктов и овощей: выжимки фруктов, жмых;
- отходы сахарной промышленности: меласса, бегасса, сточные воды сахарных производств;
- отходы кофе (кофейных жмых);
- отходы производства крахмала;
- сточные воды агропромышленных и пищевых производств.

Также в качестве сырья для производства ПГА активно рассматривается органическая фракция твердых бытовых отходов [9]. Другие потоки отходов, такие как фильтрат из компостной промышленности и городские сточные воды, могут быть рассмотрены для производства ПГА, но следует отметить, что эти потоки отличаются сложностью в процессах подготовки и очистки из-за высокого содержания азота и наличия твердых частиц [10].

3.1. Подходы к получению ПГА в лабораторных условиях

ПГА могут быть получены тремя различными способами, включая ферментативный катализ, синтез в генетически модифицированных растениях и микробную ферментацию. Среди перечисленных методов микробная ферментация была признана эффективным подходом для производства РНА [11].

Существует три основных пути производства РНА микроорганизмами [11]:

- 1. Путь I: превращение ацетил-КоА в 3-гидроксibuтирил-КоА;
- 2. Путь II: деградация жирных кислот по механизму β-окисления;
- 3. Путь III: биосинтез жирных кислот.

Пути I и III используют пригодные для ферментации сахара, в то время как путь II задействует жирные кислоты для своего роста и производства ПГА. В связи с этим, отходы, содержащие сахара и жирные кислоты, активно рассматриваются как дешевый и доступный источник углерода для синтеза полимеров. В среднем, выход ПГА для субстратов с жирными кислотами и сахарами определяется как 0,6–0,8 г/г и 0,3–0,4 г/г, соответственно [12]. Кроме того, скорость производства ПГА зависит не только от типа источника углерода, но и от концентрации питательных веществ и метаболических путей ферментирующих микроорганизмов [11].

Микроорганизмы, в основном, родов *Ralstonia* (*Cupriavidus*), *Burkholderia*, *Bacillus*, *Allochromatium*, *Pseudomonas* и *Methylobacterium* широко изучены для производства РНА путем использования различных источников углерода из отходов [12]. Примеры некоторых наиболее продуктивных штаммов по типу отходов с указанием выхода полимера представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Обобщение штаммов и типов отходов, применяемых в качестве сырья для получения ПГА

Table 1. Summary of strains and waste types used as a raw material for PNA production

| Сырье                                                                                                                                                   | Штамм, культивирование                                                                                                                                                    | Выход полимера                                  | Источник |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|
| Сточные воды пивоваренных заводов                                                                                                                       | <i>Cupriavidus necator</i>                                                                                                                                                | 0,022 г ПГБ/(л*ч)                               | [13]     |
| Сточные воды фабрики шоколадных батончиков                                                                                                              | Смешанная культура из аэробного осадка производства по очистке сточных вод, доминировал род <i>Amaricoccus</i> , биореактор                                               | 0.93 ± 0.01 г ПГА/(л*ч) (5,51 ± 0,05 г ПГБ/л)   | [14]     |
|                                                                                                                                                         | Смешанная культура из ферментированных сточных вод с фабрики по производству шоколадных батончиков Mars, доминировал род <i>Plasticicumulans acidivorans</i> , биореактор | 0.5 г ПГА/(л*ч) (0.70 ± 0.05 г/л)               | [15]     |
| Сырная сыворотка (источник углерода — лактоза)                                                                                                          | <i>Alcaligenes latus</i> , биореактор                                                                                                                                     | 0.11 г/(л*ч)                                    | [16,17]  |
| Сыворотка сыра рикотта                                                                                                                                  | Смешанная микробная культура, биореактор                                                                                                                                  | 0.037 г/(л*ч) (0.52 г ПГА/г среды)              | [18]     |
| Сыр Чеддер/сыворотка Панир                                                                                                                              | β-галактозидаза отрицательный, протеаза и липаза положительный изолят <i>Bacillus megaterium</i> штамм Ti3 (ранее называемый <i>Bacillus</i> sp. Ti3), колбы Эрленмейера  | 0.05 г/(л*ч) (2.20 ± 0.11 г/л)                  | [19]     |
| Сточные воды производства крахмала маниоки с отработанным маслом (fried oil)                                                                            | <i>P. aeruginosa</i> L2–1, колбы Эрленмейера                                                                                                                              | 1,64 ± 0.04 г/л (39% ПГА от сухого веса клеток) | [20]     |
| Cassava starch waste (волокнистые отходы и стоки с высоким содержанием крахмала/углерода)                                                               | <i>Halogeometricum borinquense</i> , колбы Эрленмейера                                                                                                                    | 1.52 г/л (44.70% г ПГА от сухого веса клеток)   | [21]     |
| Cassava starch (крахмал маниоки/кассавы)                                                                                                                | <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , колбы Эрленмейера                                                                                                                         | 0,935 г/л (57.70% г ПГА от сухого веса клеток)  | [22]     |
| Cassava starch waste (отходы производства крахмала маниоки/кассавы)                                                                                     | <i>Bacillus tequilensis</i> MSU112, биореактор                                                                                                                            | 3,346 г/л                                       | [23]     |
|                                                                                                                                                         | <i>Pseudomonas putida</i> KT2442, колбы Эрленмейера                                                                                                                       | 5,16 ± 0,23 г/л                                 | [24]     |
| Сточные воды заводов по производству оливковых масел                                                                                                    | <i>Lampropedia hyaline</i> and <i>Candidatur meganema perideroedes</i> , биореактор                                                                                       | 0.189 г/л                                       | [25]     |
|                                                                                                                                                         | <i>Azotobacter chroococcum</i> H23, колбы Эрленмейера                                                                                                                     | 1.518 г/л                                       | [26]     |
| Гидролизат отработанной кофейной гущи                                                                                                                   | <i>Halomonas halophile</i> , колбы Эрленмейера                                                                                                                            | 0,95 г/л                                        | [27]     |
| Экстрагированное кофейное масло из отработанной кофейной гущи                                                                                           | <i>Cupriavidus necator</i> H16, колбы Эрленмейера                                                                                                                         | 49.4 г/л 1,33 г/(л*ч)                           | [28]     |
|                                                                                                                                                         | <i>Pseudomonas resinovorans</i> , колбы Эрленмейера                                                                                                                       | 1.6 г/л                                         | [29]     |
| Жмых сахарного тростника с добавлением кукурузного крутого ликёра (corn steep liquor (CSL)) и отработанного экстрагированного масла из кофейных отходов | <i>Lysinibacillus</i> sp. RGS и <i>Ralstonia eutropha</i> ATCC17699, колбы Эрленмейера                                                                                    | 6,38 г/л                                        | [30]     |
|                                                                                                                                                         | <i>Pseudomonas resinovorans</i> , биореактор                                                                                                                              | 21.3 г/л 0.05 г/(л*ч)                           | [31]     |
| Виноградный жмых                                                                                                                                        | <i>C. necator</i> , колбы Эрленмейера                                                                                                                                     | 6,4 ± 1,9 г/л 0,117 г/(л*ч)                     | [32]     |
| Отработанное кулинарное масло для жарки                                                                                                                 | <i>C. necator</i> , колбы Эрленмейера                                                                                                                                     | 1.2 г/л                                         | [33]     |

Наибольшие объемные выходы полимера можно отметить в случаях с использованием в качестве субстратов:

- виноградного жмыха, как в случае с проведением экспериментов в биореакторе (21,3 г/л) и при лабораторном культивировании в колбах Эрленмейера (6,4 г/л);
- жмыха сахарного тростника (6,38 г/л), лабораторное культивирование;
- экстрагированного кофейного масла из отработанной кофейной гущи (49,4 г/л), лабораторное культивирование;
- сточных вод производства крахмала маниоки (3,346 г/л), биореактор.

Значения, получаемые в различных научных исследованиях, сильно варьируются, что также ставит под сомнение возможность их воспроизведения или масштабирования. Однако можно утверждать, что альтернативные источники сырья, такие как пищевые отходы, выступают перспективным сырьем для получения ПГА, в особенности, в случае подбора оптимальных условий культивирования и при разработке процедуры масштабирования, что в свою очередь требует проведения дополнительных исследований.

3.2. Сточные воды агропромышленных и пищевых производств

Сточные воды пищевых и агропромышленных производств различаются по составу, который зависит от производственных факторов, таких как масштаб и вид продукции (фрукты, молочные продукты, масло, овощи, мясо). Выделяются два основных пути микробиологического синтеза ПГА: с использованием сахара в качестве источника углерода или с применением жирных кислот в качестве источника

углерода. Таким образом, сточные воды, содержащие сахара и жирные кислоты, выступают в качестве перспективного сырья для производства ПГА. В настоящий момент, в качестве сырья для изготовления ПГА рассматриваются следующие типы сточных вод пищевых производств [34]:

- ❑ Сточные воды пивоваренных заводов (Brewery wastewater, Beer Brewery wastewater);
- ❑ Сточные воды фабрик по производству конфет (Candy bar factory wastewater);
- ❑ Сыворотка при производстве сыра (Cheese whey);
- ❑ Сточные воды производства крахмала маниоки (Cassava starch wastewater);
- ❑ Кофейное масло из отходов кофейного производства (Coffee waste oil, Spent coffee grounds oil);
- ❑ Вода из процессов переработки фруктов (Fruit processing water);
- ❑ Вода из процессов обработки бобовых культур (Leguminous processing water);
- ❑ Сточные воды производства молока (Milk processing wastewater);
- ❑ Сточные воды производства мороженого (Ice-cream processing wastewater);
- ❑ Сточные воды масличных производств (оливкового масла, пальмового масла) (Olive-mill wastewater, Palm oil mill effluent).

Для получения ПГА из сточных вод используются как чистые, так и смешанные культуры микроорганизмов. Последние привлекают больше внимания в связи с повышением конкурентоспособности производства ПГА за счет снижения стоимости процессов (затрат на оборудование и энергию). При использовании смешанных культур не требуются стерильные условия и могут быть задействованы дешевые низкоккачественные субстраты, такие как сточные воды. Кроме того, отмечается возможность применять в качестве смешанной культуры активный ил сточных вод. То есть, в перспективе возможна интеграция производства ПГА в процессы очистки сточных вод [35].

Тем не менее несмотря на то, что смешанные культуры позволяют получать достаточно высокие выходы ПГА, такой подход не обеспечивает образование высокооднородных полимеров, пригодных для использования в медицине и фармацевтике. Каждый вид, входящий в смешанную культуру, производит полимер с различной молярной массой, кристаллическостью и с разным мономерным составом, создавая сополимеры различного качества. Кроме того, состав конечного полимера варьируется в зависимости от изменения сырья [36].

### 3.3. Органические отходы, богатые липидами

В Европе ежегодно потребляется около 17 миллионов тонн растительных масел, и с каждым годом это количество увеличивается примерно на 2% [37]. По оценкам исследователей, ежегодное количество отходов масла для жарки в США составляет от 1,2 до 3 миллиардов галлонов в год, а в Японии — 4–6 млн тонн в год [38]. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что ресурсы отработанного фритюрного масла очень велики. Тем не менее, в странах ЕС не проводилось всестороннего исследования потенциала отработанного фритюрного масла, а сбор фритюрного масла может быть затруднителен.

В России ввиду отсутствия отдельного сбора оценка точного количества отходов фритюрного масла представляется затруднительной. Однако ответственные производители стремятся передавать вторичное сырье на переработку. Например, «Вкусно — и Точка» ежегодно отправляет на переработку около 5000 тонн фритюрного масла (что можно оценить в более, чем 80 железнодорожных цистерн). При этом 3000 тонн отправляется на получение биодизеля, а еще 2000 тонн на переработку в хозяйственное мыло и смазочные материалы. Также компания разрабатывает пилотный проект по переработке кофейного жмыха. В настоящий момент, проекты реализуются в Москве, но планируется их масштабирование.

Утверждается, что сырые и отработанные растительные масла, включая отработанное масло для жарки, могут быть использованы в качестве сырья для производства ПГА [39].

Исследования давно показали, что *Cupriavidus necator* может производить ПГБ из отработанного масла для жарки, с концентрацией, аналогичной той, что была получена из глюкозы, а именно 1,2 г/л [39]. Недавние изыскания подтверждают, что отработанное масло для жарки может стать субстратом и для *Halomonas neptunia* и *Halomonas hydrothermalis*, причем *H. hydrothermalis* способен производить сополимер 3-гидроксипропаноата и 3-гидроксивалерата. При этом при использовании валерата в качестве прекурсора доля 3НВ в сополимере достигла высоких значений — 50,15 мол.% [40].

При применении штамма *Bacillus thermoamylovorans* для получения ПГА из отработанного кулинарного масла при оптимальных условиях было получено 3,5 ± 0,1 г/л полимера, что соответствует 87,5% сухой

массы клеток. Это было достигнуто путем внесения 4% (w/v) отработанного кулинарного масла в качестве источника углерода при температуре 45 °C и 150 об/мин в течение 48 ч при периодическом культивировании. В исследовании, полученный полимер П(ЗГВ-со-ЗГВ) был использован в качестве сырья для биотоплива [41].

Сточные воды заводов по производству оливкового масла — один из основных побочных продуктов экстракции оливкового масла, вреден для окружающей среды, особенно для почвенных микроорганизмов и водных организмов.

Большинство средиземноморских стран-лидеров по производству оливкового масла страдают от экологических проблем, связанных со сточными водами заводов по производству оливковых масел [42–44]. В Испании количество отходов составляет 5 млн м<sup>3</sup>. Проблема также затрагивает Францию, Италию, Португалию, Турцию и Тунис [24].

Высокое содержание фенолов, высокая химическая потребность в кислороде и темный цвет делают проблематичным полезное использование сточных вод производства оливкового масла. Однако в этом отходе содержатся углеводы (примерно 60% от общего сухого веса), органические кислоты и минеральные питательные вещества, что делает его перспективным сырьем для производства ПГА [43].

Сточные воды скотобоев также могут стать потенциальным сырьем для получения ПГА. В результате исследований показано, что комбинацией штамма *C. necator* DSM 545 двумя последовательностями липазы, lipC и lipH из *Pseudomonas stutzeri* BT3, удалось получить штамм *C. necator* DSM 545 JR11, обладающий высокой внеклеточной липолитической активностью. *C. necator* DSM 545 JR11 позволил получить значительный выход полигидроксипальмитатов (почти 65% от сухой массы клеток) из жира вымени, щековины и перепончатого кожного жира [45].

В России статистика по количеству сточных вод представлена укрупненно по всему сектору пищевого производства. За 2020 год объем сточных вод пищевых производств составил 16,9 млн м<sup>3</sup>. При этом, согласно отчету Федеральной службы государственной статистики (Росстат), затраты на сбор и очистку сточных вод составили 2073 млн рублей, а на обращение с отходами — 1180 млн рублей [46].

### 3.4. Отходы молочной промышленности: сыворотка

В России за 2020 г. было произведено порядка 177,8 тыс. тонн молочной сыворотки, что на 18,3% выше уровня предыдущего года. К крупнейшим российским производителям молочной сыворотки относятся: АО «Данон Россия», АО «Вимм-Билль-Данн» (PepsiCo), ООО «КОМОС ГРУПП», ООО «Хохланд Руссланд», ГК «Молвест», ГК «Ренна». Сыворотка — богатая среда, отлично подходящая для роста микроорганизмов. Кроме того, отмечается значительное снижение уровня промышленной переработки сыворотки с получением сахара-сырца молочного, рафинированного, сгущенной сыворотки без сахара и с сахаром [47].

Однако проблемой использования сыворотки для получения ПГА выступает сложность ее прямого применения ввиду необходимости предварительной обработки и подбора штамма-продуцента [16]. Так, основные продуценты ПГА, такие как *Cupriavidus necator*, неспособны производить свойственные для них количества полимера (до 80% от своего сухого веса при росте на глюкозе) при росте на лактозе, выступающей преобладающим источником углерода в молочной, сырной сыворотках [16].

Решением проблемы выступает подготовка сыворотки с переводом лактозы в глюкозу и галактозу химическим или ферментативным путем. Однако в таком случае, возрастает конечная стоимость полимера, а следовательно такой способ может отрицательно сказаться на экономической эффективности процесса [16,48]. Таким образом, требуется обратить внимание на поиск «диких» штаммов, способных биосинтезировать большие количества ПГА на лактозе. Перспективным решением проблемы также может выступать генная модификация микроорганизмов. Технология рекомбинантных ДНК позволяет получить ПГА, сохранив при этом экономичность процесса. Однако при этом возникает ряд проблем, связанных с применением рекомбинантных организмов (проблема генетически модифицированных организмов (ГМО)) [49–51]. Для снижения затрат и экологических рисков также рассматривается возможность повторного использования сточных вод производства ПГА из сыворотки [52].

Получение ПГА из сыворотки также обеспечивают смешанные микробные культуры, преимуществом которых является их адаптивность к быстро меняющимся условиям, а также отсутствие необходимости стерилизации ростовой среды перед ферментацией [18,53]. При этом из смешанной культуры возможно выделение чистых культур, активно продуцирующих ПГА на исследуемом сырье.

Однако для эффективного отбора ПГА-аккумулирующих культур в смешанной культуре требуется легкодоступный источник азота [54]. Тем не менее, такой подход может позволить обнаружить новые штаммы-продуценты ПГА (так был обнаружен штамм-продуцент *L. mesenteroides*) [18].

### 3.5. Отходы переработки фруктов и овощей

Во всем мире ежегодно перерабатывается только 25% от общего объема отходов агропромышленного производства [55]. Среди отходов, образующихся в агропромышленности, отходы, получаемые из фруктов, имеют наибольший потенциал в качестве источников возобновляемой энергии, из которых можно извлекать ферменты, сахара, активированный уголь, разлагаемые пластиковые композиты, биосорбент, лекарства, биопестициды, поверхностно-активные вещества и многие другие продукты [55].

Согласно данным министерства сельского хозяйства России, ежегодно образуется более 770 млн т отходов в агропромышленном комплексе (АПК). Количество сельскохозяйственных отходов из общего числа АПК составляет 630–650 млн т. При этом количество органических отходов сельского хозяйства составляет 250 млн т, из которых 140 млн т. — отходы растениеводства, 30 млн т. — отходы пищевых и перерабатывающих заводов [56]. Однако известно, что в пищевой промышленности АПК образуется около 40 млн т. вторичных ресурсов и отходов производства, значительная часть которых вовлекается в производство новой продукции. Отходы переработки фруктов и овощей относятся к группе сельскохозяйственных пищевых отходов, но в настоящий момент точная оценка количества этих отходов не определена. Известно, что объем отходов консервации в плодоовощной промышленности составляет около 300 тыс. т. в год [56,57].

Фруктовые остатки или выжимки обычно состоят из кожицы, мякоти, плодonoжек и семян и считаются отходами, не имеющими ценности. Как правило, твердая часть фруктовых остатков выбрасывается, используется в качестве корма для животных и редко применяется в приложениях с низким экономическим эффектом [58]. Сырье из фруктовых отходов является доступной альтернативой ископаемым ресурсам, поскольку оно не вступает в прямую конкуренцию с пищевой цепочкой [59]. Кроме того, отходы фруктов и овощей — экономически доступны, так как являются кухонным отходом, образующимся во многих домах, ресторанах, магазинах, кафе [60].

Цитрусовые фрукты, включая лимоны, апельсины, грейпфруты и мандарины, являются широко распространенным видом продукции с мировым производством почти 120 миллионов тонн в год. После переработки сока 50% сырья превращается в отходы. Средний состав сухой массы этих остатков содержит: 30% сахаров (фруктоза, глюкоза, сахароза), 12% целлюлозы, 12% гемицеллюлозы, 19% пектина, а остальное — смесь флавоноидов, органических кислот, белков, золь и масла [58].

Сообщается об успешном производстве ПГА из кожуры апельсина с добавлением питательных веществ (экстракта говядины и натрия) с использованием *Bacillus subtilis*, выращенной на оптимизированной среде. Максимальный выход ПГА составил 5,09 г/л в оптимизированной среде с 0,72 г/л хлорида натрия и 2,23 г/л говяжьего экстракта при инкубации в течение 48 ч. [61]. Кожура граната также рассматривалась в качестве сырья для получения ПГА, при этом исследователи выделяли дикие штаммы из загрязненной почвы свалок. Сравнение продуктивности классического штамма *C. necator* и восьми выделенных штаммов показало, что выделенный штамм *Bacillus halotolerans* DSM8802 на коже граната в качестве субстрата смог обеспечить выход 83% ПГА, в то время как *C. necator* только 60% [60].

Перспективным сырьем для получения ПГА также могут выступать отходы винограда. Обнаружено, что *Cupriavidus necator* может производить ПГБ, используя масло и ферментируемые сахара, полнорационные из выжимки винограда [32]. Так, показано, что виноград Соларис является очень перспективным субстратом для выращивания бактерий с целью получения среднецепочечных ПГА, в связи с высоким содержанием в нем глюкозы (106 г/л). Была проведена двухступенчатая ферментация с использованием *Pseudomonas resinovorans* в качестве субстрата, а также его добавление в виде отработанного масла для жарки как прекурсора для среднецепочечных ПГА, выход достиг 21,3 г ПГА/л жмыха. Однако требуется учитывать высокое содержание лигнина в виноградном жмыхе, до 30% по сухой массе [62].

Отходы переработки яблок также рассматриваются в качестве сырья для производства полигидроксикарбоновых кислот. Так, штаммы *Pseudomonas*, выращенные на отходах яблочной мякоти, производят

ПГА с высоким содержанием полимера, с конкурентоспособными тепловыми и механическими свойствами [63,64].

Состав фруктов и их отходов может значительно отличаться друг от друга, однако для производства ПГА могут использоваться любые фрукты с достаточным количеством углеводов. Учитывая, что в состав фруктов входят сложные сахара, требуется предварительная подготовка отходов фруктов методами ферментации и гидролиза, для получения легко усваиваемых микроорганизмами простых сахаров. Тем не менее, рост микроорганизмов может быть ингибирован наличием фенолов в составе субстрата [65]. Значительные выходы ПГА с различным составом, в том числе, среднецепочечные ПГА, могут быть получены при применении смешанных культур в трехстадийном процессе [65–67]:

- 1) ацидогенная ферментация для преобразования органического углерода в растворимые продукты ферментации (РПФ), которые являются предшественниками для биосинтеза ПГА;
- 2) отбор обогащенной культуры, продуцирующей ПГА;
- 3) накопление ПГА, когда ранее отобранная культура питается РПФ и накапливает ПГА до максимальных выходов.

При получении богатого капроатами фильтрата на стадии ферментации с последующим подбором культуры, способной переводить капроаты в 3-гидроксигексаноат (ННх), удалось достигнуть крайне высоких выходов полимера 71,3%, а именно терполимера с составом 33/1/66 (3-гидроксипропанат (ЗГП)/3-гидроксивалерат (ЗГВ)/3-гидроксигексаноат (ЗГГ), % масс.) [67].

### 3.6. Отходы сахарной и крахмальной промышленности

К отходам сахарной и крахмальной промышленности относят: свекольные хвостики, бой свеклы, жом, мелассу, багассу, мезгу, кукурузный экстракт и другие. Включая сточные воды, ежегодно в России образуется около 60 млн т. Отходов сахарной промышленности. Количество свекольного жома в России оценивается как 9 млн т в год [56,68].

Самые высокие показатели производства (с точки зрения внутриклеточного накопления РНА) обычно достигаются при использовании чистых сахаров (т. е. глюкозы), а затем альтернативного сырья с высоким содержанием углеводов, такого как маниока и сахарный тростник. Такие крахмалистые материалы из сельскохозяйственных культур или сточных производственных вод выступают перспективными субстратами, поскольку имеют низкую стоимость, характеризуются возобновляемостью и доступностью на местном уровне [22].

Багасса сахарного тростника используется для выработки электроэнергии и производства этанола второго поколения в промышленных масштабах, поэтому реже рассматривается в качестве сырья для получения ПГА [69]. Однако исследования штамма *Burkholderia sacchari* показали, что возможно получить 105 г/л Р(ЗНВ) при использовании гидролизата багассы сахарного тростника, богатого глюкозой, ксилитом и арабинозой [70].

Благодаря высокому содержанию сахарозы и небольшому количеству глюкозы и фруктозы меласса широко используется в качестве дешевого источника углерода в процессе производства биотоплива и биополимеров [71]. Тростниковая меласса эффективно применялась как сырье для получения ПГА с использованием почвенной бактерии *Pseudomonas aeruginosa*, были достигнуты следующие показатели: максимальная клеточная масса  $7,32 \pm 0,2$  г/л и концентрация ПГА  $5,60 \pm 0,3$  г/л через 54 ч. культивирования. Также было выявлено, что мочевины является более эффективным источником азота по сравнению с другими неорганическими альтернативами, и при ее добавлении к мелассе значительно увеличивается выхода продукта, что повышает экономичность процесса [72].

Сравнение мелассы с другими отходами АПК (сточные воды бумажного и молочного производств) показало, что значительную роль играет предварительная обработка сырья. Так, при оптимальных условиях для инкубирования штамма *Bacillus subtilis* RS1 (время инкубации 48 ч; pH 7; инокулят 10% v/v) и предварительной подготовке сырья (доведение pH до 3, центрифугирование, автоклавирование) удалось достигнуть высоких показателей выхода полимера — 70,5% [73]. Результаты сравнения мелассы, оливкового масла и их смеси в качестве субстрата для *C. necator* показали, что совместное использование двух субстратов позволяет получить больший выход вещества (40% в сравнении с 24,33% для мелассы и с 18,66% для оливкового масла). Максимальное содержание ПГА при использовании комбинации субстратов составило 2,03 г/л по сравнению с мелассой (1,41 г/л) и оливковым маслом (1,12 г/л). Кроме того, отмечаются способность штамма расти на сложных субстратах из отходов [9].

Несмотря на то, что меласса отличается высокой концентрацией сахаров и микроэлементов (кальция, фосфора, биотина, ниацина и рибофлавина) и активно рассматривается в качестве сырья для

получения ПГА, следует учитывать, что она также характеризуется дефицитом основных минералов, таких как кобальт и селен, которые повышают активность фермента ПГБ-синтазы [69]. Кроме того, отмечается влияние режима питания на состав и свойства полимера. Так, в случае с мелассой сахарного тростника, на выход и состав ПГА влияют тип и концентрация органических кислот в ферментированной мелассе [75]. Таким образом, использование мелассы для производства ПГА может быть экономически эффективным, но требует тщательного внимания к составу субстрата и режиму питания для достижения оптимальных выходов и свойств полимера.

### 3.7. Отходы производства кофе

Кофе является вторым по величине продаваемым в мире товаром, его производство достигло 167,17 миллионов тонн в 2021 году, при этом на всех стадиях процесса переработки от плодов кофе до напитка в стакане или чашке образуется огромное количество отходов. Годовые отходы кофе, по оценкам исследователей, превышают 23 миллиона тонн в год [29,76].

Твердые отходы производства кофе включают в себя: кофейную пульпу, кофейную шелуху, отработанный кофе (отработанную кофейную гущу (Spent coffee grounds (SCG)). Отходы кофе являются недорогим сырьем, содержащим жирные кислоты, богатым полифенолами, каротиноидами и органическими кислотами [77].

Отработанная кофейная гуща содержит от 11 до 20% кофейного масла, характеризуется высоким содержанием свободных жирных кислот, которые могут быть легко использованы микроорганизмами в питании [78]. Выход ПГБ при применении штамма *Cupriavidus necator H16* при периодическом режиме культивирования достиг 89,1 масс% (1,33 г/(л\*ч)) [28]. Кофейный жмых и кофейное масло рассматриваются как сырье для производства биодизеля, однако высокое содержание свободных жирных кислот порождает проблемы при его производстве, в то время как для биосинтеза ПГБ наличие таких кислот является значительным преимуществом. В то же время кофейный жмых может быть полезно утилизирован в энергию без значительной потери энергетической ценности после отжима масла, а следовательно, возможно совмещение производства ПГБ из кофейного масла и получения дополнительной энергии из кофейных пеллет, что может снизить стоимость производства полимера. Кроме того, высокое содержание свободных жирных кислот затрудняет изготовление биодизеля, поэтому использование извлеченного кофейного масла для производства ПГА является выгодным [76].

Кофейное масло показывает положительные результаты при добавлении его в основной субстрат при биосинтезе полимера. Сокультивирование *Lysinibacillus sp. RGS* и *Ralstonia eutropha ATCC17699* на субстрате из жмыха сахарного тростника с добавлением кукурузного крутого ликёра (corn steep liquor (CSL)) и отработанного экстрагированного масла из кофейных отходов (spent coffee waste extracted oil (SCGO)) позволило получить максимальный рост культуры и выход полимера (11,68 и 11,0 г/л), накопление ПГА (76% и 76%) [30]. Показательна и эффективность применения двух культур, производящих ПГА с различной метаболической активностью, что может рассматриваться как жизнеспособный вариант для достижения более высокой производительности ПГА. Для получения ПГА из экстрагированного масла отработанной кофейной гущи использовался штамм *Pseudomonas resinovorans*, сухой вес клеток составлял 5,4 г/л, РНА — 1,6 г/л, а содержание РНА — 29,5% через 24 часа [29].

Однако использование кофейных отходов в качестве сырья для получения ПГА имеет ряд сложностей. Так, выявлено, что метод заваривания кофе влияет на содержание биоактивных соединений в SCG, что может повлиять на качество получаемого ПГА [79]. Также отработанная кофейная гуща содержит в себе микробные ингибиторы, которые могут препятствовать производству ПГА, а для стимулирования ферментации необходима детоксикация гидролизатов отработанной кофейной гущи [27].

Гидролизат отработанной кофейной гущи содержит леулиновую кислоту, которая служит предшественником для биосинтеза ПГА, но также содержит полифенолы, которые снижают выход полимера. Как решение данной проблемы предлагается экстракция полифенолов этанолом. Кроме того, отмечается, что использование кофейного масла, полученного из отработанной кофейной гущи, позволяет повысить выход ПГА, что, вероятно, связано с высоким содержанием свободных жирных кислот в масле [80].

## 4. Выводы

Из-за обостряющейся проблемы накопления пластиковых отходов, в качестве более экологичного полимера рассматриваются биоразлагаемые полимеры, такие как полигидроксисилканоаты. Хотя РНА и их сополимеры вызвали значительный интерес научного сообщества благодаря своему структурному разнообразию и сходству механических свойств (например, прочности, жесткости и гибкости) с традиционными аналогами, высокая стоимость производства ограничивает крупномасштабное изготовление этих биополимеров. Основные затраты производства ПГА связываются с сырьем, в качестве которого используется чистая глюкоза. Для снижения стоимости полимера рассматривается возможность использования вторичного сырья — отходов пищевого производства и агропромышленного комплекса. Проведенное исследование позволило визуализировать и выявить три основных направления научных исследований ПГА, а также их получения из пищевых отходов:

1. Исследование и изучение ПГА, лабораторное получение полимера, его сополимеров и оценка их механических свойств.
2. Пищевые отходы как сырье для получения ПГА: изучение видов, улучшение качества сырья, валоризация.
3. Вызовы и эффекты применения ПГА, производство полимера, противопоставление или сравнение с пластиками.

В ходе детального анализа научных публикаций, были установлены основные достижения в сфере получения ПГА из пищевых отходов, выявлены сложности использования конкретного типа вторичного сырья и определены основные штаммы-продуценты ПГА для каждого типа сырья. Так, к наиболее перспективному сырью для получения ПГА можно отнести: органические отходы, богатые липидами (отходы производства растительных масел), отходы фруктов и овощей, молочную сыворотку, отходы сахарной и крахмальной промышленности (меласса, багасса), отходы кофе (отработанная кофейная гуща, экстрагированные из нее кофейные масла), а также сточные воды пищевых производств. Однако для широкого внедрения вторичного сырья в промышленное производство ПГА требуются дальнейшие исследования, направленные на поиск способов повышения выхода полимера, в том числе, за счет предварительной подготовки вторичного сырья путем гидролиза и ферментации. Также необходимо выявление эффективных штаммов-продуцентов ПГА и создание оптимальных условий получения полимера.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sirohi, R., Pandey, J.P., Gaur, V.K., Gnansounou, E., Sindhu, R. (2020). Critical overview of biomass feedstocks as sustainable substrates for the production of polyhydroxybutyrate (PHB). *Bioresource Technology*, 311, Article 123536. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123536>
2. Pakalapati, H., Chang, C.-K., Show, P. L., Arumugasamy, S. K., Lan, J. C.-W. (2018). Development of polyhydroxyalkanoates production from waste feedstocks and applications. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.016>
3. Polyhydroxyalkanoate Market Size and Share Analysis — Growth Trends and Forecasts (2024–2029) Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polyhydroxyalkanoate-market> Accessed September 18, 2023
4. Markets and Markets. (2022). Global Polyhydroxyalkanoate (PHA) Market by Type (Short chain length, Medium Chain Length), Production Methods (Sugar Fermentation, Vegetable Oil Fermentation), Application (Packaging and Food Services, Biomedical) and Region — Global Forecast to 2027. Retrieved from <https://www.researchandmarkets.com/reports/5241294/global-polyhydroxyalkanoate-pha-market-by> Accessed September 18, 2023
5. Пресс-служба Министерства сельского хозяйства Российской Федерации: Завод по производству биопластика из пшеницы построят в ОЭЗ «Липецк». (2019). Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Электронный ресурс <https://mcx.gov.ru/press-service/regions/zavod-po-proizvodstvu-bioplastika-iz-pshenitsy-postroyat-v-oez-lipetsk/>. Дата доступа 25.09.2023
6. Dalton, B., Bhagabati, P., De Micco, J., Padamati, R. B., O'Connor, K. (2022). A review on biological synthesis of the biodegradable polymers polyhydroxyalkanoates and the development of multiple applications. *Catalysts*, 12(3), Article 319. <https://doi.org/10.3390/catal12030319>
7. Koller, M., Gasser, I., Schmid, F., Berg, G. (2011). Linking ecology with economy: Insights into polyhydroxyalkanoate-producing microorganisms. *Engineering in Life Sciences*, 11(3), 222–237. <https://doi.org/10.1002/elsc.201000190>
8. Kannah, R.Y., Kumar, M.D., Kavitha, S., Banu, J.R., Tyagi, V.K., Rajaguru, P. et al. (2022). Production and recovery of polyhydroxyalkanoates (PHA) from waste streams — A review. *Bioresource Technology*, 366, Article 128203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128203>
9. Allegue, L. D., Ventura, M., Melero, J. A., Puyol, D. (2022). Unraveling PHA production from urban organic waste with purple phototrophic bacteria via organic overload. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, Article 112687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112687>
10. Rajvanshi, J., Sogani, M., Kumar, A., Arora, S., Syed, Z., Sonu, K. et al. (2023). Perceiving biobased plastics as an alternative and innovative solution to combat

- plastic pollution for a circular economy. *Science of The Total Environment*, 874, Article 162441. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162441>
11. Saratale, R. G., Cho, S.-K., Kadam, A. A., Ghodake, G. S., Kumar, M., Bharagava, R. N. et al. (2022). Developing microbial co-culture system for enhanced Polyhydroxyalkanoates (PHA) production using acid pretreated lignocellulosic biomass. *Polymers*, 14(4), Article 726. <https://doi.org/10.3390/polym14040726>
  12. Park, S. J., Ahn, W. S., Green, P. R., Lee, S. Y. (2001). Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-3-hydroxyhexanoate) by metabolically engineered *Escherichia coli* strains. *Biotechnology and Bioengineering*, 74(1), 82–87. <https://doi.org/10.1002/bit.1097>
  13. Amini, M., Yousefi-Masumabad, H., Younesi, H., Abyar, H., Bahramifar, N. (2020). Production of the polyhydroxyalkanoate biopolymer by *Cupriavidus necator* using beer brewery wastewater containing maltose as a primary carbon source. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), Article 103588. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103588>
  14. Rangel, C., Carvalho, G., Oehmen, A., Frison, N., Lourenço, N. D., Reis, M. A. M. (2023). Polyhydroxyalkanoates production from ethanol- and lactate-rich fermentate of confectionary industry effluents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 229, 713–723. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.268>
  15. Tamis, J., Lužkov, K., Jiang, Y., van Loosdrecht, M. C. M., Kleerebezem, R. (2014). Enrichment of *Plasticumulans acidivorans* at pilot-scale for PHA production on industrial wastewater. *Journal of Biotechnology*, 192(A), 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.10.022>
  16. Amaro, T. M. M., Rosa, D., Comi, G., Iacumin, L. (2019). Prospects for the use of whey for Polyhydroxyalkanoate (PHA) production. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 992. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00992>
  17. Berwig, K. H., Baldasso, C., Dettmer, A. (2016). Production and characterization of poly(3-hydroxybutyrate) generated by *Alcaligenes latus* using lactose and whey after acid protein precipitation process. *Bioresource Technology*, 218, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.067>
  18. Bosco, F., Cirrincione, S., Carletto, R., Marmo, L., Chiesa, F., Mazzoli, R. et al. (2021). PHA production from cheese whey and “Scotta”: Comparison between a consortium and a pure culture of *Leuconostoc mesenteroides*. *Microorganisms*, 9(12), Article 2426. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122426>
  19. Israni, N., Venkatachalam, P., Gajaraj, B., Varalakshmi, K. N., Shivakumar, S. (2020). Whey valorization for sustainable polyhydroxyalkanoate production by *Bacillus megaterium*: Production, characterization and in vitro biocompatibility evaluation. *Journal of Environmental Management*, 255, Article 109884. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109884>
  20. Costa, S. G. V. A. O., Lépine, F., Milot, S., Déziel, E., Nitschke, M., Contiero, J. (2009). Cassava wastewater as a substrate for the simultaneous production of rhamnolipids and polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 36(8), 1063–1072. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0590-3>
  21. Salgaonkar, B. B., Mani, K., Bragança, J. M. (2019). Sustainable bioconversion of cassava waste to Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by *Haloquadratum walsbyi* strain E3. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(2), 299–308. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1346-9>
  22. Hierro-Iglesias, C., Chimpango, A., Thornley, P., Fernández-Castané, A. (2022). Opportunities for the development of cassava waste biorefineries for the production of polyhydroxyalkanoates in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, 166, Article 106600. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106600>
  23. Chaleomrurn, N., Chookietwattana, K., Dararat, S. (2014). Production of PHA from cassava starch wastewater in sequencing batch reactor treatment system. *APCBEE Procedia*, 8, 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.apcb.2014.03.021>
  24. Pozo, C., Martínez-Toledo, M. V., Rodelas, B., González-López, J. (2002). Effects of culture conditions on the production of polyhydroxyalkanoates by *Azotobacter chroococcum* H23 in media containing a high concentration of alpechin (wastewater from olive oil mills) as primary carbon source. *Journal of Biotechnology*, 97(2), 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00056-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00056-1)
  25. Beccari, M., Bertin, L., Dionisi, D., Fava, F., Lampis, S., Majone, M. et al. (2009). Exploiting olive oil mill effluents as a renewable resource for production of biodegradable polymers through a combined anaerobic-aerobic process: Bio-production of PHA from olive mill effluents. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(6), 901–908. <https://doi.org/10.1002/jctb.2173>
  26. Cerrone, F., Sánchez-Peñado, M. del, M., Juárez-Jimenez, B., González-López, J., Pozo, C. (2010). Biological treatment of two-phase olive mill wastewater (TPOMW, alpeoruro): Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production by *Azotobacter* strains. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20(3), 594–601.
  27. Kovalcik, A., Kucera, D., Matouskova, P., Pernicova, I., Obruca, S., Kalina, M. et al. (2018). Influence of removal of microbial inhibitors on PHA production from spent coffee grounds employing *Halomonas halophila*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3495–3501. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.028>
  28. Obruca, S., Petrik, S., Benesova, P., Svoboda, Z., Eremka, L., Marova, I. (2014). Utilization of oil extracted from spent coffee grounds for sustainable production of polyhydroxyalkanoates. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(13), 5883–5890. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5653-3>
  29. Kang, B.-J., Jeon, J.-M., Bhatia, S. K., Kim, D.-H., Yang, Y.-H., Jung, S. et al. (2023). Two-stage bio-hydrogen and polyhydroxyalkanoate production: Upcycling of spent coffee grounds. *Polymers*, 15(3), Article 681. <https://doi.org/10.3390/polym15030681>
  30. Saratale, R.G., Cho, S.-K., Saratale, G.D., Kadam, A. A., Ghodake, G. S., Kumar, M. et al. (2021). A comprehensive overview and recent advances on polyhydroxyalkanoates (PHA) production using various organic waste streams. *Bioresource Technology*, 325, Article 124685. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124685>
  31. Follonier, S., Goyder, M. S., Silvestri, A.-C., Crelier, S., Kalman, F., Riesen, R. et al. (2014). Fruit pomace and waste frying oil as sustainable resources for the bioproduction of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.05.061>
  32. Kovalcik, A., Pernicova, I., Obruca, S., Sztokowski, M., Enev, V., Kalina, M. et al. (2020). Grape winery waste as a promising feedstock for the production of polyhydroxyalkanoates and other value-added products. *Food and Bioprocess Technology*, 124, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.08.003>
  33. Verlinden, R. A., Hill, D. J., Kenward, M. A., Williams, C. D., Piotrowska-Seget, Z., Radecka, I. K. (2011). Production of polyhydroxyalkanoates from waste frying oil by *Cupriavidus necator*. *AMB Express*, 1(1), Article 11. <https://doi.org/10.1186/2191-0855-1-11>
  34. Costa, C. F. F. A., Amorim, C. L., Duque, A. F., Reis, M. A. M., Castro, P. M. L. (2022). Valorization of wastewater from food industry: Moving to a circular bioeconomy. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21(1), 269–295. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09600-1>
  35. Mannina, G., Presti, D., Montiel-Jarillo, G., Carrera, J., Suárez-Ojeda, M. E. (2020). Recovery of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 297, Article 122478. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122478>
  36. Gecim, G., Aydın, G., Tavsanoglu, T., Erkoc, E., Kalemte, A. (2021). Review on extraction of polyhydroxyalkanoates and astaxanthin from food and beverage processing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 40, Article 101775. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101775>
  37. Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E. (May 12–13, 2011). *Characterization of waste frying oils obtained from different facilities*. World Renewable Energy Congress – Sweden. Linköping, 2011. <https://doi.org/10.3384/ecp11057479>
  38. Nitin, S. (2017). Investigation of waste frying oil as a green alternative fuel: An approach to reduce NOx emission. Chapter in a book: *Biofuels and Bioenergy* (BICE2016). Springer International Publishing, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47257-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47257-7_11)
  39. Ciesielski, S., Mozejko, J., Pisutpaisal, N. (2015). Plant oils as promising substrates for polyhydroxyalkanoates production. *Journal of Cleaner Production*, 106, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.040>
  40. Pernicova, I., Kucera, D., Nebesarova, J., Kalina, M., Novackova, I., Koller, M. et al. (2019). Production of polyhydroxyalkanoates on waste frying oil employing selected *Halomonas* strains. *Bioresource Technology*, 292, Article 122028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122028>
  41. Sangkharak, K., Khaithongkaeo, P., Chuakhunupakarn, T., Choonut, A., Prasertsan, P. (2021). The production of polyhydroxyalkanoate from waste cooking oil and its application in biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), 1651–1664. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00657-6>
  42. Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies. *Process Biochemistry*, 48(10), 1532–1552. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.07.010>
  43. Dionisi, D., Carucci, G., Papini, M. P., Riccardi, C., Majone, M., Carrasco, F. (2005). Olive oil mill effluents as a feedstock for production of biodegradable polymers. *Water Research*, 39(10), 2076–2084. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.011>
  44. Naitkou, I., Peroni, C.V., Kourmentza, C., Ilieva, V. I., Morelli, A., Chiellini, E. et al. (2014). Microbial bio-based plastics from olive-mill wastewater: Generation and properties of polyhydroxyalkanoates from mixed cultures in a two-stage pilot scale system. *Journal of Biotechnology*, 188, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.08.015>
  45. Rodríguez G., J. E., Brojanigo, S., Basaglia, M., Favaro, L., Casella, S. (2021). Efficient production of polyhydroxybutyrate from slaughterhouse waste using a recombinant strain of *Cupriavidus necator* DSM 545. *Science of The Total Environment*, 794, Article 148754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148754>
  46. Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. (2021). Федеральная служба государственной статистики (Росстат), Москва, 2021.
  47. Бережная, Е.А. (2021). Современное состояние и перспективы переработки молочной сыворотки. *Вестник науки*, 3(1(34)), 131–135.
  48. Zotta, T., Solieri, L., Iacumin, L., Picozzi, C., Gullo, M. (2020). Valorization of cheese whey using microbial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(7), 2749–2764. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10408-2>
  49. Akhlaq, S., Singh, D., Mittal, N., Srivastava, G., Siddiqui, S., Faridi, S. A. et al. (2023). Polyhydroxybutyrate biosynthesis from different waste materials, degradation, and analytic methods: A short review. *Polymer Bulletin*, 80(6), 5965–5997. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04406-9>
  50. Batcha, A. F. M., Prasad, D. M. R., Khan, M. R., Abdullah, H. (2014). Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) by *Cupriavidus necator* H16 from jatropha oil as carbon source. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37(5), 943–951. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1066-4>
  51. Bholia, S., Arora, K., Kulshrestha, S., Mehariya, S., Bhatia, R. K., Kaur, P. et al. (2021). Established and emerging producers of PHA: Redefining the possibility. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193(11), 3812–3854. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03626-5>
  52. Koller, M. (2015). Recycling of Waste streams of the biotechnological Poly(hydroxyalkanoate) production by *haloferax mediterranei* on whey. *International Journal of Polymer Science*, 2015, Article 370164. <https://doi.org/10.1155/2015/370164>
  53. Gahlawat, G., Kumari, P., Bhagat, N. R. (2020). Technological advances in the production of Polyhydroxyalkanoate biopolymers. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 7(3), 73–83. <https://doi.org/10.1007/s40518-020-00154-4>
  54. Oliveira, C. S. S., Silva, M. O. D., Silva, C. E., Carvalho, G., Reis, M. A. M. (2018). Assessment of protein-rich cheese whey waste stream as a nutrients source for low-cost mixed microbial PHA production. *Applied Sciences*, 8(10), Article 1817. <https://doi.org/10.3390/app8101817>
  55. Kee, S. H., Ganeson, K., Rashid, N. F. M., Yatim, A. F. M., Vigneswari, S., Amirul, A.-A. et al. (2022). A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants. *Fuel*, 321, Article 124039. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124039>
  56. Ветошкин, А. Г. (2019). Техника и технология обращения с отходами жизнедеятельности: Учебное пособие. В 2-х частях. Ч. 2. Переработка и утилизация промышленных отходов. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2019.

57. Комарова, Е.В., Буряков, А.В., Суржко, О.А. (2017). Получение биогаза из отходов плодоовощных консервных заводов. *Инновационная наука*, 5, 58–61.
58. Andler, R., Valdés, C., Urtuvia, V., Andreeßen, C., Díaz-Barrera, A. (2021). Fruit residues as a sustainable feedstock for the production of bacterial polyhydroxyalkanoates. *Journal of Cleaner Production*, 307, Article 127236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127236>
59. Govil, T., Wang, J., Samanta, D., David, A., Tripathi, A., Rauniyar, S. et al. (2020). Lignocellulosic feedstock: A review of a sustainable platform for cleaner production of nature's plastics. *Journal of Cleaner Production*, 270, Article 122521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122521>
60. Rayasam, V., Chavan, P., Kumar, T. (2020). Polyhydroxyalkanoate synthesis by bacteria isolated from landfill and ETP with pomegranate peels as carbon source. *Archives of Microbiology*, 202(10), 2799–2808. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01995-9>
61. Umesh, M., Sankar, S. A., Thazeem, B. (2021). Fruit Waste as Sustainable Resources for Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production. Chapter in a book: *Bioplastics for Sustainable Development*. Springer, Singapore, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9_7)
62. Basso, D., Weiss-Hortala, E., Patuzzi, F., Baratieri, M., Fiori, L. (2018). In deep analysis on the behavior of grape marc constituents during hydrothermal carbonization. *Energies*, 11(6), Article 1379. <https://doi.org/10.3390/en11061379>
63. Rebocho, A. T., Pereira, J. R., Freitas, F., Neves, L. A., Alves, V. D., Sevrin, C. et al. (2019). Production of medium-chain length polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas citronellolis* grown in apple pulp waste. *Applied Food Biotechnology*, 6(1), 71–82. <https://doi.org/10.22037/afb.v6i1.21793>
64. Pereira, J. R., Araújo, D., Freitas, P., Marques, A. C., Alves, V. D., Sevrin, C. et al. (2021). Production of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca*: Cultivation on fruit pulp waste and polymer characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.162>
65. Umesh, M., Sarojini, S., Choudhury, D.D., Santhosh, A.S., Kariyadan, S. (2023). Food waste valorization for bioplastic production. Chapter in a book: *Waste valorization for value-added products*. Bentham Science Publishers, 2023. <https://doi.org/10.2174/9789815123074123010013>
66. Matos, M., Cruz, R. A. P., Cardoso, P., Silva, F., Freitas, E. B., Carvalho, G. et al. (2021). Combined strategies to boost polyhydroxyalkanoate production from fruit waste in a three-stage pilot plant. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(24), 8270–8279. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02432>
67. Silva, F., Matos, M., Pereira, B., Ralo, C., Pequeto, D., Marques, N. et al. (2022). An integrated process for mixed culture production of 3-hydroxyhexanoate-rich polyhydroxyalkanoates from fruit waste. *Chemical Engineering Journal*, 427, Article 131908. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131908>
68. Балабина, И. П., Проценко, Е. П., Алферова, Е. Ю., Косолапова, Н. И., Мирошниченко, О. В. (2019). Утилизация органических отходов от сахарной промышленности компостированием. *Экология урбанизированных территорий*, 4, 27–33. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-14027>
69. De Melo, R. N., de Souza Hassemer, G., Steffens, J., Junges, A., Valduga, E. (2023). Recent updates to microbial production and recovery of polyhydroxyalkanoates. *3 Biotech*, 13(6), Article 204. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03633-9>
70. Cesário, M. T., Raposo, R. S., de Almeida, M. C. M. D., van Keulen, F., Ferreira, B. S., da Fonseca, M. M. R. (2014). Enhanced bioproduction of poly-3-hydroxybutyrate from wheat straw lignocellulosic hydrolysates. *New Biotechnology*, 31(1), 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.10.004>
71. Zhang, L., Jiang, Z., Tsui, T.-H., Loh, K.-C., Dai, Y., Tong, Y. W. (2022). A review on enhancing *Cupriavidus necator* fermentation for Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) production from low-cost carbon sources. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, Article 946085. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.946085>
72. Tripathi, A. D., Yadav, A., Jha, A., Srivastava, S. K. (2012). Utilizing of sugar refinery waste (Cane Molasses) for production of bio-plastic under submerged fermentation process. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(2), 446–453. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0394-1>
73. Rathika, R., Janaki, V., Shanthi, K., Kamala-Kannan, S. (2019). Bioconversion of agro-industrial effluents for polyhydroxyalkanoates production using *Bacillus subtilis* RS1. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5725–5734. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2155-3>
74. Razzaq, S., Shahid, S., Farooq, R., Noreen, S., Perveen, S., Bilal, M. (2022). Sustainable bioconversion of agricultural waste substrates into poly (3-hydroxyhexanoate) (mcl-PHA) by *Cupriavidus necator* DSM 428. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03194-6>
75. Albuquerque, M. G. E., Martino, V., Pollet, E., Avérous, L., Reis, M. A. M. (2011). Mixed culture polyhydroxyalkanoate (PHA) production from volatile fatty acid (VFA)-rich streams: Effect of substrate composition and feeding regime on PHA productivity, composition and properties. *Journal of Biotechnology*, 151(1), 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.10.070>
76. Garcia, C. V., Kim, Y.-T. (2021). Spent coffee grounds and coffee silverskin as potential materials for packaging: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(8), 2372–2384. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02067-9>
77. Sisti, L., Celli, A., Totaro, G., Cinelli, P., Signori, F., Lazzeri, A. et al. (2021). Monomers, materials and energy from coffee by-products: A review. *Sustainability*, 13(12), Article 6921. <https://doi.org/10.3390/su13126921>
78. Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.023>
79. Glowacka, R., Górska, A., Wirkowska-Wojdyła, M., Wołosiak, R., Majewska, E., Derewiaka, D. (2019). The influence of brewing method on bioactive compounds residues in spent coffee grounds of different roasting degree and geographical origin. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(11), 3008–3014. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14213>
80. Obruca, S., Benesova, P., Petrik, S., Oborna, J., Prikryl, R., Marova, I. (2014). Production of polyhydroxyalkanoates using hydrolysate of spent coffee grounds. *Process Biochemistry*, 49(9), 1409–1414. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.05.013>

## REFERENCES

1. Sirohi, R., Pandey, J.P., Gaur, V.K., Gnansounou, E., Sindhu, R. (2020). Critical overview of biomass feedstocks as sustainable substrates for the production of polyhydroxybutyrate (PHB). *Bioresource Technology*, 311, Article 123536. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123536>
2. Pakalapati, H., Chang, C.-K., Show, P. L., Arumugasamy, S. K., Lan, J. C.-W. (2018). Development of polyhydroxyalkanoates production from waste feedstocks and applications. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.016>
3. Polyhydroxyalkanoate Market Size and Share Analysis – Growth Trends and Forecasts (2024–2029) Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polyhydroxyalkanoate-market> Accessed September 18, 2023
4. Markets and Markets. (2022). Global Polyhydroxyalkanoate (PHA) Market by Type (Short chain length, Medium Chain Length), Production Methods (Sugar Fermentation, Vegetable Oil Fermentation), Application (Packaging and Food Services, Biomedical) and Region – Global Forecast to 2027. Retrieved from <https://www.researchandmarkets.com/reports/5241294/global-polyhydroxyalkanoate-pha-market-by> Accessed September 18, 2023
5. Press Information Department of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation: A plant for production of bioplastic from wheat will be built in the SEZ "Lipetsk" (2019). Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Retrieved from <https://mcx.gov.ru/press-service/regions/zavod-po-proizvodstvu-bioplastika-iz-pshenitsy-postroyat-v-oez-lipetsk/> Accessed September 18, 2023. (In Russian)
6. Dalton, B., Bhagabati, P., De Micco, J., Padamati, R. B., O'Connor, K. (2022). A review on biological synthesis of the biodegradable polymers polyhydroxyalkanoates and the development of multiple applications. *Catalysts*, 12(3), Article 319. <https://doi.org/10.3390/catal12030319>
7. Koller, M., Gasser, I., Schmid, F., Berg, G. (2011). Linking ecology with economy: Insights into polyhydroxyalkanoate-producing microorganisms. *Engineering in Life Sciences*, 11(3), 222–237. <https://doi.org/10.1002/elsc.201000190>
8. Kannan, R.Y., Kumar, M.D., Kavitha, S., Banu, J.R., Tyagi, V.K., Rajaguru, P. et al. (2022). Production and recovery of polyhydroxyalkanoates (PHA) from waste streams – A review. *Bioresource Technology*, 366, Article 128203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128203>
9. Allegue, L. D., Ventura, M., Melero, J. A., Puyol, D. (2022). Unraveling PHA production from urban organic waste with purple phototrophic bacteria via organic overload. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, Article 112687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112687>
10. Rajvanshi, J., Sogani, M., Kumar, A., Arora, S., Syed, Z., Sonu, K. et al. (2023). Perceiving biobased plastics as an alternative and innovative solution to combat plastic pollution for a circular economy. *Science of The Total Environment*, 874, Article 162441. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162441>
11. Saratale, R. G., Cho, S.-K., Kadam, A. A., Ghodake, G. S., Kumar, M., Bharagava, R. N. et al. (2022). Developing microbial co-culture system for enhanced Polyhydroxyalkanoates (PHA) production using acid pretreated lignocellulosic biomass. *Polymers*, 14(4), Article 726. <https://doi.org/10.3390/polym14040726>
12. Park, S. J., Ahn, W. S., Green, P. R., Lee, S. Y. (2001). Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-3-hydroxyhexanoate) by metabolically engineered *Escherichia coli* strains. *Biotechnology and Bioengineering*, 74(1), 82–87. <https://doi.org/10.1002/bit.1097>
13. Amini, M., Yousefi-Massumabad, H., Younesi, H., Abyar, H., Bahramifar, N. (2020). Production of the polyhydroxyalkanoate biopolymer by *Cupriavidus necator* using beer brewery wastewater containing maltose as a primary carbon source. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), Article 103588. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103588>
14. Rangel, C., Carvalho, G., Oehmen, A., Frison, N., Lourenço, N. D., Reis, M. A. M. (2023). Polyhydroxyalkanoates production from ethanol- and lactate-rich fermentate of confectionary industry effluents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 229, 713–723. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.268>
15. Tamis, J., Lužkov, K., Jiang, Y., van Loosdrecht, M. C. M., Kleerebezem, R. (2014). Enrichment of *Plasticumulans acidivorans* at pilot-scale for PHA production on industrial wastewater. *Journal of Biotechnology*, 192(A), 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.10.022>
16. Amaro, T. M. M., Rosa, D., Comi, G., Iacumin, L. (2019). Prospects for the use of whey for Polyhydroxyalkanoate (PHA) production. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 992. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00992>
17. Berwig, K. H., Baldasso, C., Dettmer, A. (2016). Production and characterization of poly(3-hydroxybutyrate) generated by *Alcaligenes latus* using lactose and whey after acid protein precipitation process. *Bioresource Technology*, 218, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.067>
18. Bosco, F., Cirrincione, S., Carletto, R., Marmo, L., Chiesa, F., Mazzoli, R. et al. (2021). PHA production from cheese whey and "Scotta": Comparison between a consortium and a pure culture of *Leuconostoc mesenteroides*. *Microorganisms*, 9(12), Article 2426. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122426>
19. Israni, N., Venkatachalam, P., Gajaraj, B., Varalakshmi, K. N., Shivakumar, S. (2020). Whey valorization for sustainable polyhydroxyalkanoate production by *Bacillus megaterium*: Production, characterization and in vitro biocompatibility evaluation. *Journal of Environmental Management*, 255, Article 109884. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109884>
20. Costa, S. G. V. A. O., Lépine, F., Milot, S., Déziel, E., Nitschke, M., Contiero, J. (2009). Cassava wastewater as a substrate for the simultaneous production of rhamnolipids and polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 36(8), 1063–1072. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0590-3>

21. Salgaonkar, B. B., Mani, K., Bragança, J. M. (2019). Sustainable bioconversion of cassava waste to Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by Halogeometricum borinquense strain E3. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(2), 299–308. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1346-9>
22. Hierro-Iglesias, C., Chimphango, A., Thornley, P., Fernández-Castané, A. (2022). Opportunities for the development of cassava waste biorefineries for the production of polyhydroxyalkanoates in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, 166, Article 106600. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106600>
23. Chaleomrur, N., Chookietwattana, K., Dararat, S. (2014). Production of PHA from cassava starch wastewater in sequencing batch reactor treatment system. *APCBEE Procedia*, 8, 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.apcb.2014.03.021>
24. Pozo, C., Martínez-Toledo, M. V., Rodelas, B., González-López, J. (2002). Effects of culture conditions on the production of polyhydroxyalkanoates by *Azotobacter chroococcum* H23 in media containing a high concentration of alpechín (wastewater from olive oil mills) as primary carbon source. *Journal of Biotechnology*, 97(2), 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00056-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00056-1)
25. Beccari, M., Bertin, L., Dionisi, D., Fava, F., Lampis, S., Majone, M. et al. (2009). Exploiting olive oil mill effluents as a renewable resource for production of biodegradable polymers through a combined anaerobic-aerobic process: Bio-production of PHA from olive mill effluents. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(6), 901–908. <https://doi.org/10.1002/jctb.2173>
26. Cerrone, F., Sánchez-Peñado M. del, M., Juárez-Jimenez, B., González-López, J., Pozo, C. (2010). Biological treatment of two-phase olive mill wastewater (TPOMW, alpeorjo): Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production by *Azotobacter* strains. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20(3), 594–601.
27. Kovalcik, A., Kucera, D., Matouskova, P., Pernicova, I., Obruca, S., Kalina, M. et al. (2018). Influence of removal of microbial inhibitors on PHA production from spent coffee grounds employing *Halomonas halophila*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3495–3501. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.028>
28. Obruca, S., Petrik, S., Benesova, P., Svoboda, Z., Eremka, L., Marova, I. (2014). Utilization of oil extracted from spent coffee grounds for sustainable production of polyhydroxyalkanoates. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(13), 5883–5890. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5653-3>
29. Kang, B.-J., Jeon, J.-M., Bhatia, S. K., Kim, D.-H., Yang, Y.-H., Jung, S. et al. (2023). Two-stage bio-hydrogen and polyhydroxyalkanoate production: Upcycling of spent coffee grounds. *Polymers*, 15(3), Article 681. <https://doi.org/10.3390/polym15030681>
30. Saratale, R.G., Cho, S.-K., Saratale, G.D., Kadam, A. A., Ghodake, G. S., Kumar, M. et al. (2021). A comprehensive overview and recent advances on polyhydroxyalkanoates (PHA) production using various organic waste streams. *Bioresource Technology*, 325, Article 124685. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124685>
31. Follonier, S., Goyder, M. S., Silvestri, A.-C., Crelier, S., Kalman, F., Riesen, R. et al. (2014). Fruit pomace and waste frying oil as sustainable resources for the bioproduction of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.05.061>
32. Kovalcik, A., Pernicova, I., Obruca, S., Szotkowski, M., Enev, V., Kalina, M. et al. (2020). Grape winery waste as a promising feedstock for the production of polyhydroxyalkanoates and other value-added products. *Food and Bioprocess Processing*, 124, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.08.003>
33. Verlinden, R. A., Hill, D. J., Kenward, M. A., Williams, C. D., Piotrowska-Seget, Z., Radecka, I. K. (2011). Production of polyhydroxyalkanoates from waste frying oil by *Cupriavidus necator*. *AMB Express*, 1(1), Article 11. <https://doi.org/10.1186/2191-0855-1-11>
34. Costa, C. F. F. A., Amorim, C. L., Duque, A. F., Reis, M. A. M., Castro, P. M. L. (2022). Valorization of wastewater from food industry: Moving to a circular bioeconomy. *Reviews in Environmental Science and Nano/Technology*, 21(1), 269–295. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09600-1>
35. Mannina, G., Presti, D., Montiel-Jarillo, G., Carrera, J., Suárez-Ojeda, M. E. (2020). Recovery of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 297, Article 122478. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122478>
36. Gecim, G., Aydin, G., Tavsanoglu, T., Erkok, E., Kalemte, A. (2021). Review on extraction of polyhydroxyalkanoates and astaxanthin from food and beverage processing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 40, Article 101775. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101775>
37. Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E. (May 12–13, 2011). *Characterization of waste frying oils obtained from different facilities*. World Renewable Energy Congress – Sweden. Linköping, 2011. <https://doi.org/10.3384/ecp11057479>
38. Nitin, S. (2017). Investigation of waste frying oil as a green alternative fuel: An approach to reduce NOx emission. Chapter in a book: *Biofuels and Bioenergy* (BICE2016). Springer International Publishing, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47257-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47257-7_11)
39. Ciesielski, S., Możejko, J., Pisutpaisal, N. (2015). Plant oils as promising substrates for polyhydroxyalkanoates production. *Journal of Cleaner Production*, 106, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.040>
40. Pernicova, I., Kucera, D., Nebesarova, J., Kalina, M., Novackova, I., Koller, M. et al. (2019). Production of polyhydroxyalkanoates on waste frying oil employing selected *Halomonas* strains. *Bioresource Technology*, 292, Article 122028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122028>
41. Sangkharak, K., Khaithongkaeo, P., Chuaihunupakarn, T., Choonut, A., Prasertsan, P. (2021). The production of polyhydroxyalkanoate from waste cooking oil and its application in biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), 1651–1664. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00657-6>
42. Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Mouliti-Mati, F., Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies. *Process Biochemistry*, 48(10), 1532–1552. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.07.010>
43. Dionisi, D., Carucci, G., Papini, M. P., Riccardi, C., Majone, M., Carrasco, F. (2005). Olive oil mill effluents as a feedstock for production of biodegradable polymers. *Water Research*, 39(10), 2076–2084. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.011>
44. Ntaikou, I., Peroni, C.V., Kourmentza, C., Ilieva, V. I., Morelli, A., Chiellini, E. et al. (2014). Microbial bio-based plastics from olive-mill wastewater: Generation and properties of polyhydroxyalkanoates from mixed cultures in a two-stage pilot scale system. *Journal of Biotechnology*, 188, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.08.015>
45. Rodríguez G., J. E., Brojanigo, S., Basaglia, M., Favaro, L., Casella, S. (2021). Efficient production of polyhydroxybutyrate from slaughterhouse waste using a recombinant strain of *Cupriavidus necator* DSM 545. *Science of The Total Environment*, 794, Article 148754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148754>
46. Main indicators of environmental protection. Statistical Bulletin. (2021) Federal State Statistics Service (Rosstat), Moscow, 2021. (In Russian)
47. Berezhnaya, E.A. (2021). Current state and prospects of whey processing. *Vestnik Nauki*, 3(1(34)), 131–135. (In Russian)
48. Zotta, T., Solieri, L., Iacumin, L., Picozzi, C., Gullo, M. (2020). Valorization of cheese whey using microbial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(7), 2749–2764. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10408-2>
49. Akhlaq, S., Singh, D., Mittal, N., Srivastava, G., Siddiqui, S., Faridi, S. A. et al. (2023). Polyhydroxybutyrate biosynthesis from different waste materials, degradation, and analytic methods: A short review. *Polymer Bulletin*, 80(6), 5965–5997. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04406-9>
50. Batcha, A. F.M., Prasad, D. M. R., Khan, M. R., Abdullah, H. (2014). Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) by *Cupriavidus necator* H16 from jatropha oil as carbon source. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37(5), 943–951. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1066-4>
51. Bholia, S., Arora, K., Kulshrestha, S., Mehariya, S., Bhatia, R. K., Kaur, P. et al. (2021). Established and emerging producers of PHA: Redefining the possibility. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193(11), 3812–3854. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03626-5>
52. Koller, M. (2015). Recycling of Waste streams of the biotechnological Poly(hydroxyalkanoate) production by *haloflex mediterranei* on whey. *International Journal of Polymer Science*, 2015, Article 370164. <https://doi.org/10.1155/2015/370164>
53. Gahlawat, G., Kumari, P., Bhagat, N. R. (2020). Technological advances in the production of Polyhydroxyalkanoate biopolymers. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 7(3), 73–83. <https://doi.org/10.1007/s40518-020-00154-4>
54. Oliveira, C. S. S., Silva, M. O. D., Silva, C. E., Carvalho, G., Reis, M. A. M. (2018). Assessment of protein-rich cheese whey waste stream as a nutrients source for low-cost mixed microbial PHA production. *Applied Sciences*, 8(10), Article 1817. <https://doi.org/10.3390/app8101817>
55. Kee, S. H., Ganeson, K., Rashid, N. F. M., Yatim, A. F. M., Vigneswari, S., Amirul, A.-A. A. et al. (2022). A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and bioisofactants. *Fuel*, 321, Article 124039. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124039>
56. Vetoshkin, A.G. (2019). Technique and technology of handling waste from human activities: Textbook. In 2 parts. Part 2 Processing and disposal of industrial waste. Moscow, Vologda: Infra-Enzheneria, 2019. (In Russian)
57. Komarova, E.V., Buryakov, A.V., Surzhko, O.A. (2017). Production of biogas from waste of canning plants. *Innovation Science*, 5, 58–61. (In Russian)
58. Andler, R., Valdés, C., Urtuvia, V., Andreeßen, C., Díaz-Barrera, A. (2021). Fruit residues as a sustainable feedstock for the production of bacterial polyhydroxyalkanoates. *Journal of Cleaner Production*, 307, Article 127236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127236>
59. Govil, T., Wang, J., Samanta, D., David, A., Tripathi, A., Rauniyar, S. et al. (2020). Lignocellulosic feedstock: A review of a sustainable platform for cleaner production of nature's plastics. *Journal of Cleaner Production*, 270, Article 122521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122521>
60. Rayasam, V., Chavan, P., Kumar, T. (2020). Polyhydroxyalkanoate synthesis by bacteria isolated from landfill and ETP with pomegranate peels as carbon source. *Archives of Microbiology*, 202(10), 2799–2808. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01995-9>
61. Umesh, M., Sankar, S. A., Thazeem, B. (2021). Fruit Waste as Sustainable Resources for Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production. Chapter in a book: *Bioplastics for Sustainable Development*. Springer, Singapore, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1823-9_7)
62. Basso, D., Weiss-Hortala, E., Patuzzi, F., Baratieri, M., Fiori, L. (2018). In deep analysis on the behavior of grape marc constituents during hydrothermal carbonization. *Energies*, 11(6), Article 1379. <https://doi.org/10.3390/en11061379>
63. Rebocho, A. T., Pereira, J. R., Freitas, F., Neves, L. A., Alves, V. D., Sevrin, C. et al. (2019). Production of medium-chain length polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas citronellolis* grown in apple pulp waste. *Applied Food Biotechnology*, 6(1), 71–82. <https://doi.org/10.22037/afb.v6i1.21793>
64. Pereira, J. R., Araújo, D., Freitas, P., Marques, A. C., Alves, V. D., Sevrin, C. et al. (2021). Production of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca*: Cultivation on fruit pulp waste and polymer characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.162>
65. Umesh, M., Sarojini, S., Choudhury, D.D., Santhosh, A.S., Kariyadan, S. (2023). Food waste valorization for bioplastic production. Chapter in a book: *Waste valorization for value-added products*. Bentham Science Publishers, 2023. <https://doi.org/10.2174/9789815123074123010013>
66. Matos, M., Cruz, R. A. P., Cardoso, P., Silva, F., Freitas, E. B., Carvalho, G. et al. (2021). Combined strategies to boost polyhydroxyalkanoate production from fruit waste in a three-stage pilot plant. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(24), 8270–8279. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02432>
67. Silva, F., Matos, M., Pereira, B., Ralo, C., Pequeto, D., Marques, N. et al. (2022). An integrated process for mixed culture production of 3-hydroxyhexanoate-rich polyhydroxyalkanoates from fruit waste. *Chemical Engineering Journal*, 427, Article 131908. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131908>
68. Balabina, I.P., Protchenko, E.P., Alferova, E.Y., Kosolapova, N.I., Miroshnichenko, O.V. (2019). Disposal of organic waste from the sugar industry by composting. *Ecology of Urban Areas*, 4, 27–33. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-14027> (In Russian)

69. De Melo, R. N., de Souza Hassemer, G., Steffens, J., Junges, A., Valduga, E. (2023). Recent updates to microbial production and recovery of polyhydroxyalkanoates. *3 Biotech*, 13(6), Article 204. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03633-9>

70. Cesário, M. T., Raposo, R. S., de Almeida, M. C. M. D., van Keulen, F., Ferreira, B. S., da Fonseca, M. M. R. (2014). Enhanced bioproduction of poly-3-hydroxybutyrate from wheat straw lignocellulosic hydrolysates. *New Biotechnology*, 31(1), 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.10.004>

71. Zhang, L., Jiang, Z., Tsui, T.-H., Loh, K.-C., Dai, Y., Tong, Y. W. (2022). A review on enhancing *Cupriavidus necator* fermentation for Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) production from low-cost carbon sources. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, Article 946085. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.946085>

72. Tripathi, A. D., Yadav, A., Jha, A., Srivastava, S. K. (2012). Utilizing of sugar refinery waste (Cane Molasses) for production of bio-plastic under submerged fermentation process. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(2), 446–453. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0394-1>

73. Rathika, R., Janaki, V., Shanthi, K., Kamala-Kannan, S. (2019). Bioconversion of agro-industrial effluents for polyhydroxyalkanoates production using *Bacillus subtilis* RS1. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5725–5734. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2155-3>

74. Razzaq, S., Shahid, S., Farooq, R., Noreen, S., Perveen, S., Bilal, M. (2022). Sustainable bioconversion of agricultural waste substrates into poly (3-hydroxyhexanoate) (mcl-PHA) by *Cupriavidus necator* DSM 428. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03194-6>

75. Albuquerque, M. G. E., Martino, V., Pollet, E., Avérous, L., Reis, M. A. M. (2011). Mixed culture polyhydroxyalkanoate (PHA) production from volatile fatty acid (VFA)-rich streams: Effect of substrate composition and feeding regime on PHA productivity, composition and properties. *Journal of Biotechnology*, 151(1), 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.10.070>

76. Garcia, C. V., Kim, Y.-T. (2021). Spent coffee grounds and coffee silverskin as potential materials for packaging: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(8), 2372–2384. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02067-9>

77. Sisti, L., Celli, A., Totaro, G., Cinelli, P., Signori, F., Lazzeri, A. et al. (2021). Monomers, materials and energy from coffee by-products: A review. *Sustainability*, 13(12), Article 6921. <https://doi.org/10.3390/su13126921>

78. Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.023>

79. Glowacka, R., Górská, A., Wirkowska-Wojdyła, M., Wołosiak, R., Majewska, E., Derewiaka, D. (2019). The influence of brewing method on bioactive compounds residues in spent coffee grounds of different roasting degree and geographical origin. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(11), 3008–3014. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14213>

80. Obruca, S., Benesova, P., Petrik, S., Oborna, J., Prikryl, R., Marova, I. (2014). Production of polyhydroxyalkanoates using hydrolysate of spent coffee grounds. *Process Biochemistry*, 49(9), 1409–1414. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.05.013>

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | AUTHOR INFORMATION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Принадлежность к организации</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Affiliation</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Кузнецова Анна Павловна</b> — аспирант, факультет биотехнологий (BioTech), Университет ИТМО<br>191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9<br>Тел.: +7–911–132–76–58<br>E-mail: apkuznetcova@itmo.ru<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-4130-8362">https://orcid.org/0000-0003-4130-8362</a><br>* автор для контактов         | <b>Anna P. Kuznetsova</b> , PhD Student, Faculty of Biotechnologies (BioTech), ITMO University<br>9, Lomonosova Str., St. Petersburg, 191002, Russia<br>Tel.: +7–911–132–76–58<br>E-mail: apkuznetcova@itmo.ru<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-4130-8362">https://orcid.org/0000-0003-4130-8362</a><br>* corresponding author     |
| <b>Аль-Шехадат Руслан Исмаилович</b> — кандидат биологических наук, доцент, факультет биотехнологий (BioTech), Университет ИТМО<br>191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9<br>Тел.: +7–812–988–89–99<br>E-mail: al-shekhadat@itmo.ru<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2897-3114">https://orcid.org/0000-0003-2897-3114</a> | <b>Ruslan I. Al-Shekhadat</b> , Candidate of Biological Sciences Docent, Faculty of Biotechnology (BioTech), ITMO University<br>9, Lomonosova Str., St. Petersburg, 191002, Russia<br>Tel.: +7–812–988–89–99<br>E-mail: al-shekhadat@itmo.ru<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2897-3114">https://orcid.org/0000-0003-2897-3114</a> |
| <b>Критерии авторства</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Contribution</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.                                                                                                                                                                                                                                    | Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Конфликт интересов</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Conflict of interest</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.                                                                                                                                                                                                                                                                                          | The authors declare no conflict of interest.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |