

РАЗЛОЖЕНИЕ ПЛАСТИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРООРГАНИЗМОВ В АПК

Решетникова С.Н., кандидат сельскохозяйственных наук,

тел. 8(8422) 55-95-47, reset-69@mail.ru

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Яковлева О.Н., кандидат биологических наук,

тел. 89033367710, personal765076@mail.ru

Бутюгина М.А., студентка, m.butyugina@yandex.ru

Астахова В.В., студентка, v1421266@gmail.com

**Институт агробиотехнологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**

***Ключевые слова:** микропластик, микроорганизмы, разложение, агропромышленный комплекс.*

При использовании пластиковых изделий частицы микропластика способны попадать в почву, что в масштабах агропромышленного комплекса наносит особый вред. Микропластик негативно влияет на почвенные процессы, жизнедеятельность растений и микроорганизмов. В статье приводится обзор способов борьбы с пластиком с помощью микроорганизмов.

Актуальность. С каждым годом масштабы производства пластика растут, ведь пластик является удобным в использовании и недорогим в производстве материалом. Однако на его разложение понадобится более 100 лет, за которые пластик неизбежно повлияет на окружающую среду. Сегодня многие производители ищут безопасную альтернативу пластику, а также безвредные для природы и экономически выгодные способы утилизации. Биоразложение пластика с помощью микроорганизмов является биологическим способом борьбы с пластиковыми отходами и может не иметь негативных последствий. Важно как можно быстрее найти решение проблемы, ведь чем раньше оно будет найдено, тем больше шансов, что, приняв соответствующие меры, удастся минимизировать ущерб для природы.

Цель исследования: исследовать возможность переработки микропластика с помощью микроорганизмов для сокращения негативного воздействия пластика на окружающую среду.

Методы исследования:

- теоретические – обзор литературы по теме исследования;
- эмпирические – описание, сравнение, обработка и анализ результатов.

Результаты исследований и их обсуждение. Сегодня пластиковые изделия плотно вошли в нашу жизнь. С 1950 по 2020 год на Земле было произведено почти 9 млрд тонн пластика. Согласно статистическим данным, лишь 9% этого объёма было переработано, 12% сожжено, а оставшиеся 79% не были подвергнуты переработке и находятся на полигонах твёрдых бытовых отходов, нелегальных свалках или в природной среде [1]. Пластик используется везде: от разных бытовых предметов до крупной промышленности, медицины и, конечно, агропромышленного комплекса (АПК). Однако при использовании и деградации пластик распадается на микропластик (МП) - фрагменты синтетических полимеров, размеры которых не превышают 5 мм. Частицы микропластика имеют огромное влияние на свойства почвы, например, МП может менять движение воды и воздуха в почвенных капиллярах, изменять pH почвы, снижать общую ёмкость катионного обмена. Это все приводит к ухудшению роста и развития растений, а также воздействует на микроорганизмы и почвенных животных [2]. Кроме того, двигаясь по пищевой цепочке, микропластик наносит вред людям.

Важно понимать, что речь идет не об отказе использования пластика, а о поиске способа безопасной и экономически выгодной утилизации. К сожалению, сегодня намного дешевле производить новый пластик, чем правильно утилизировать или перерабатывать старый. А при сжигании пластика в атмосферу выделяются токсические вещества, наносящие вред окружающей среде и здоровью человека. Безопасным считается биологический способ борьбы с пластиковыми отходами.

Как микропластик влияет на микроорганизмы. Микропластик способен выделять токсичные вещества, влияющие на почвенные микроорганизмы, изменяя состав микроценоза, снижая

численность чувствительных видов (например, актиномицетов, цианобактерий, микоризных грибов), подавлять их ферментативную активность. В ряде случаев наблюдается адаптация и даже частичное биоразложение пластика штаммами родов *Pseudomonas*, *Rhodococcus* и *Bacillus* [3]. Микроорганизмы пытаются приспособиться к присутствию микропластика, но этот процесс сопровождается значительным снижением численности и разнообразия микробного сообщества.

Экспериментально доказана способность условно-патогенных микроорганизмов видов *K. pneumoniae*, *P. vulgaris*, *E. coli*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *S. haemolyticus*, *C. albicans* к биопленкообразованию на поверхности нескольких видов пластика (полиэтилен низкого давления, полипропилен, полистирол, полиэтилентерефталат, поливинилхлорид) [4]. Биопленкообразование - это процесс формирования биоплёнок - сообществ микроорганизмов, клетки которых прикреплены друг к другу и погружены в выделяемое ими внеклеточное полимерное вещество (внеклеточный матрикс) - слизь. Высокая активность биопленкообразования условно-патогенных микроорганизмов говорит о риске возникновения инфекций. А поскольку в природе данный процесс также происходит, это повышает риск попадания в пищевые цепи возбудителей инфекций и дальнейшее отравление живых организмов.

Особый интерес представляет явление «пластисферы» — формирование на поверхности микропластика мультивидовых микробных биопленок. Эти сообщества не только меняют физико-химические свойства поверхности пластика (его плавучесть, гидрофобность), но и играют ключевую роль в процессах биокоррозии и деградации. Состав таких биопленок может существенно отличаться от состава микрофлоры окружающей среды, а сами микропластики выступают в качестве векторов для распространения микроорганизмов, в том числе патогенов, и горизонтального переноса генов, например, устойчивости к антибиотикам [5].

Воздействие микроорганизмов на разложение пластика. Пластик, попадая в почву, не является для микроорганизмов привычным источником питания, однако в процессе эволюции у некоторых бактерий и грибов сформировались адаптационные механизмы, позволяющие использовать полимеры в качестве субстрата.

Поиск биологических и биотехнологических путей разложения пластмасс рассматривается как одна из перспективных возможностей решения проблемы пластикового загрязнения.

Процесс микробной деградации пластика состоит из нескольких этапов. Ключевая роль принадлежит ферментам, выделяемым микроорганизмами. Еще в начале 2000-х годов исследователи находили ферменты (например, кутиназы из бактерии *Thermobifida cellulosilytica*), способные расщеплять стойкие пластики, такие как полиэтилентерефталат (ПЭТ) [6].

Прорывным стало открытие японскими учеными бактерии *Ideonella sakaiensis* 201-F6, которая использует пластик в качестве единственного источника энергии и пищи, разлагая его с помощью специализированных ферментов — PETase и MHETase [6]. В отличие от более ранних ферментов, для которых способность разлагать пластик была «побочным эффектом», у *Ideonella sakaiensis* она является узкоспециализированной, что открыло новые перспективы для биотехнологии.

Способностью к биodeградации обладают не только выделенные из окружающей среды штаммы, но и микроорганизмы, ассоциированные с другими организмами. Так, культура *Wickerhamomyces anomalus*, выделенная из пищеварительной системы мучных червей, а также бактерия *Microbacterium* sp., изолированная с образца полимерного материала, долгое время находившегося в контакте с почвой, проявили активность в отношении ряда полимеров, включая полиэтилентерефталат, полипропилен и полистирол [7].

Важным фактором, влияющим на эффективность биodeградации, является доступность полимерной цепи для микроорганизмов. Предварительная химическая обработка пластика (например, 46% NaOH или 80% молочной кислотой) разрушает связи между звеньями высокомолекулярных соединений, что облегчает микроорганизмам доступ к мономерам. Эксперименты показали, что у предварительно обработанных образцов ПВХ и ПЭТ наблюдается значительный прирост потери массы при культивировании на них бактериальной культуры [7]. Это подтверждает, что агрессивные среды могут выступать в роли катализатора, ускоряющего последующую микробную деструкцию.

Таким образом, микробная деградация — это сложный процесс, перспективы которого связаны с поиском новых активных штаммов (как *Ideonella sakaiensis*), оптимизацией условий (включая предварительную обработку полимеров) и изучением синтетических микробных сообществ, способных эффективно разрушать пластик в природных средах и на очистных сооружениях.

Перспективы. Несмотря на обнадеживающие результаты лабораторных исследований, промышленное применение микробной деградации пластика пока ограничено. Основные барьеры - низкая скорость разложения (большинство известных штаммов разрушают пластик за недели и месяцы) и чувствительность ферментов к условиям окружающей среды (температуре, pH, наличию других органических субстратов).

Тем не менее, можно выделить несколько перспективных направлений развития этой технологии:

1. Подробное изучение специализированных ферментов PETase и MHETase у вида *Ideonella sakaiensis*, перспективы возможности их модификации.

2. Предварительная обработка полимеров. Как показали эксперименты, химическая обработка пластика щелочью или кислотами значительно повышает его доступность для микроорганизмов. В будущем возможно создание комбинированных технологий: химическая (или фотохимическая, под действием УФ-излучения) деструкция как первый этап, за которым следует микробная доочистка.

3. В природе пластик разрушают не одиночные бактерии, а их сообщества - «пластисфера». Перспективно создание синтетических микробных групп, где один вид осуществляет первичную деструкцию полимера, а другой метаболизирует образующиеся промежуточные продукты, включая возможные токсичные соединения.

4. Особый интерес представляет внесение в почву бактериальных препаратов-деструкторов (на основе *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Bacillus*) непосредственно в зоны скопления микропластика - например, под мульчирующей пленкой или в тепличных хозяйствах. Это могло бы стать частью стратегии «зеленого» земледелия.

5. Альтернативный путь - создание биоразлагаемых пластиков со слабой связью между звеньями, которые легко гидролизуются микробными ферментами. Однако здесь важна осторожность: такие пластики не должны начинать разрушаться в процессе эксплуатации.

6. Важно при этом понимать, каким способом будут уничтожены колонии микроорганизмов после утилизации пластика. Перед запуском данной программы необходимо просчитать возможные риски, чтобы колонии не вышли из-под контроля.

Таким образом, микробная деградация вряд ли полностью заменит традиционные методы переработки пластика в ближайшем будущем, но может стать важным дополнением к существующим стратегиям, особенно для трудно перерабатываемых видов пластика и для очистки уже загрязненных почв.

Заключение. Установлено, что частицы микропластика изменяют физико-химические свойства почвы (пористость, pH, катионный обмен), ухудшают рост и развитие растений, а также следуют по пищевым цепям, представляя долговременную экологическую угрозу для агропромышленного комплекса и здоровья человека.

1. Микропластик способен выделять токсичные вещества, изменяя состав почвенного микроценоза: снижается численность чувствительных видов и подавляется их ферментативная активность. Однако у некоторых бактерий наблюдаются адаптационные механизмы, включая способность к биопленкообразованию на поверхности пластика и частичному биоразложению. Формирование «пластисферы» меняет свойства поверхности пластика и может способствовать распространению патогенов и генов антибиотикорезистентности.

2. Биodeградация пластика микроорганизмами - реально существующий, но пока медленный процесс. Ключевую роль в нем играют специализированные ферменты, такие как PETase и MHETase у бактерии *Ideonella sakaiensis*. Способностью к деструкции полимеров обладают также *Wickerhamomyces anomalus* и *Microbacterium* sp. Предварительная химическая обработка пластика значительно повышает эффективность биodeградации.

3. Наиболее многообещающие пути решения проблемы пластикового загрязнения в сельском хозяйстве - это создание рекомбинантных штаммов с усиленной ферментативной активностью, использование комбинированных методов (химическая обработка + микробная деструкция), применение микробных сообществ и направленная биоремедиация загрязненных почв. Микробная деградация не заменит полностью переработку пластика, но станет важным элементом «зеленой» стратегии обращения с отходами в агропромышленном комплексе.

Библиографический список:

1. Каленов, С. В. Культивирование бактериальных сообществ в присутствии частиц микропластика / С. В. Каленов, А. А. Кузьмицкая // Актуальные аспекты и перспективы развития современной биотехнологии : Сборник докладов Международной научной конференции, Белгород, 26–28 марта 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 254-258. – EDN LZNYPH.

2. Бутюгина, М. А. Трансформация почвенной среды под воздействием частиц микропластика: физико-химические и биологические аспекты / М. А. Бутюгина, А. А. Воронина, В. В. Астахова // Сборник трудов Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием X Вильямсовские чтения к 160-летию Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева : Сборник трудов, Москва, 27–29 ноября 2025 года. – Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2025. – С. 276-281.

3. Молдагалиева, А. А. Влияние микропластика на структуру и активность почвенных микроорганизмов / А. А. Молдагалиева // Вестник науки и образования. – 2025. – № 8-2(163). – С. 5-6. – EDN UMQNCC.

4. Маккавеева, А. А. Изучение биопленкообразования условно-патогенных микроорганизмов на разных видах микропластика / А. А. Маккавеева, Е. Н. Утева // Медицина завтрашнего дня : Материалы XXIV Научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием, Читинская государственная медицинская

академия, 22–25 апреля 2025 года. – Чита: Читинская государственная медицинская академия, 2025. – С. 309-310. – EDN EGLBOF.

5. Микропластики – новая экологическая ниша в пластисфере для мультивидовых микробных биопленок / М. В. Журина, К. И. Богданов, А. В. Ганнесен [и др.] // Микробиология. – 2022. – Т. 91, № 2. – С. 131-149. – DOI 10.31857/S0026365622020148. – EDN LOXEFL.

6. Какагелдиева, А. Д. Микроорганизмы - как решение проблемы переработки пластика / А. Д. Какагелдиева, А. М. Овезгулыева, Н. Б. Назаров // Академическая публицистика. – 2025. – № 2-1. – С. 12-17. – EDN ZXKUPF.

7. Исследование альтернативного способа утилизации пластиковых отходов с применением микроорганизмов / С. М. Кузнецова, Е. В. Вруцкая, Ю. С. Евдокимова [и др.] // Экологические проблемы промышленных городов : Сборник научных трудов 11-ой Международной научно-практической конференции, Саратов, 26–28 апреля 2023 года. – Саратов: ООО "Амирит", 2023. – С. 36-39. – EDN ZJQNHV.

DECOMPOSITION OF PLASTIC UNDER THE INFLUENCE OF MICROORGANISMS IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Reshetnikova S.N.

FSBEI HE Ulyanovsk SAU

Yakovleva O.N., Butyugina M.A., Astakhova V.V.

**Institute of Agrobiotechnology FSBEI HE RGAU-MSHA
named after K.A. Timiryazev**

Keywords: *microplastics, microorganisms, decomposition, agro-industrial complex.*

When plastic products are used, microplastic particles can enter the soil, which is particularly harmful in the agricultural sector. Microplastics negatively impact soil processes, plant life, and microorganisms. This article provides an overview of microbial-based approaches to combating plastic pollution.