

Читайте
онлайн
Read
online

Маркова Ю.М., Смотрина Ю.В., Быкова И.Б., Полянина А.С., Стеценко В.В.,
Ефимочкина Н.Р., Шевелёва С.А.

Образование биоплёнок на микропластиках в пищевой цепи и их роль как векторов переноса возбудителей пищевых токсикоинфекций (обзор литературы, часть 2)

ФГБУН Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, 109240, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

В первой части обзора «Микробные риски, обусловленные микропластиками в пищевой цепи, и меры возможного противодействия» были рассмотрены пути попадания микропластиков в пищеварительный тракт человека и механизмы их негативного влияния, опосредованные взаимодействием с микробиотой и мукозальным барьером кишечника. Вторая часть обзора посвящена механизмам образования непосредственно контактирующих с муциновым слоем слизистой оболочки микробных биоплёнок, формирующихся на микро- и нанопластиках, и их роли как векторов переноса патогенных микроорганизмов, токсинов, генов трансмиссивной антибиотикоустойчивости. Показано, что поверхности частиц микро- и нанопластиков в различных объектах пищевой цепи могут служить адгезивным каркасом для бактерий, микроводорослей, вирусов, некоторых микромицетов, а также низкомолекулярных микробных метаболитов и других биомолекул. Отмечено, что в ассоциациях микро- и нанопластиков с бактериями, простейшими и микроводорослями, среди которых могут присутствовать возбудители пищевых токсикоинфекций и инвазий, изменяются функциональные свойства последних, часто увеличивается вирулентность, а также повышается антибиотикоустойчивость за счёт фиксирующего действия биоплёнки и лучшей выживаемости микроорганизмов при наличии питательного субстрата в так называемой «белковой короне» (внутреннем слое биоплёнки). Подчёркнуто, что в составе биоплёнок особую активность проявляют бактерии, обладающие муколитическими и протеолитическими ферментами, в частности представители рода *Vibrio* и семейства *Pseudomonadaceae*, что повышает долю этих возбудителей в структуре современных острых кишечных инфекций и пищевых токсикоинфекций. Попадание такого рода комплексов в желудочно-кишечный тракт человека способно вызывать аномально острую реакцию мукозальной иммунной системы, которая в свою очередь может быть пусковым фактором поликлонального ответа, лежащего в основе атопий. Приводятся данные о возможности поступления в организм опасных для человека в малых дозах токсинов цианобактерий в составе биоплёнок на микропластиках, загрязняющих рыбные и морепродукты, в первую очередь получаемые в аква- и марикультуре. С учётом микробиологических рисков для здоровья человека, связанных с загрязнением пищевых продуктов и других объектов пищевой цепи частицами микро- и нанопластиков, ассоциированных с микробными биоплёнками, в обзоре сформулированы необходимость защиты потребителей, обоснование превентивных мер и приведены конкретные примеры их реализации в пищевой промышленности.

Ключевые слова: микропластик; микроорганизмы; бактериальные токсины; биоплёнки; пищевые продукты; пищевые токсикоинфекции

Для цитирования: Маркова Ю.М., Смотрина Ю.В., Быкова И.Б., Полянина А.С., Стеценко В.В., Ефимочкина Н.Р., Шевелёва С.А. Образование биоплёнок на микропластиках в пищевой цепи и их роль как векторов переноса возбудителей пищевых токсикоинфекций (обзор литературы, часть 2). *Гигиена и санитария*. 2025; 104(5): 621–630. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-621-630> <https://elibrary.ru/cbmqdz>

Для корреспонденции: Смотрина Юлия Владимировна, e-mail: yukorotkevich@gmail.com

Участие авторов: Маркова Ю.М., Смотрина Ю.В. — сбор и обработка данных, написание текста, редактирование; Быкова И.Б., Полянина А.С., Стеценко В.В. — сбор и обработка данных; Ефимочкина Н.Р. — написание текста, редактирование; Шевелёва С.А. — концепция исследования, написание текста, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи и ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Работа выполнена за счёт средств субсидии на выполнение государственного задания в рамках Программы фундаментальных научных исследований (тема Минобрнауки России № FGMF-2023-0005).

Поступила: 15.11.2024 / Поступила после доработки: 07.03.2025 / Принята к печати: 26.03.2025 / Опубликовано: 27.06.2025

Yulia M. Markova, Yulia V. Smotrina, Irina B. Bykova, Anna S. Polyana, Valentina V. Stetsenko,
Natalya R. Efimochkina, Svetlana A. Sheveleva

Formation of biofilms on microplastics in the food chain and their role as vectors of transfer of foodborne pathogens (literature review, part 2)

Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation

ABSTRACT

The first part of the review, “Microbial risks associated with microplastics in the food chain and possible control measures”, examined the pathways by which microplastics enter the human digestive tract and mechanisms of their adverse effects mediated by interactions with the microbiota and the intestinal mucosal barrier.

This part of the review is devoted to the mechanism of microbial biofilm forming directly contacting with the the mucin layer of the mucosa, formed on micro- and nanoplastics, and their role as vectors of transfer of pathogenic microorganisms, their toxins, and genes of transmissible antimicrobial resistance. It is shown that the surfaces of micro- and nanoplastic particles in various objects of the food chain can serve as an adhesive framework for bacteria, microalgae, viruses, a number of micromycetes, as well as low molecular weight microbial metabolites and other biomolecules. It is noted that in associations of micro- and nanoplastics with bacteria, protozoa, and microalgae, among which there may be pathogens of food toxic infections and invasions, the functional properties of the latter change, virulence often increases, as well as elevates antimicrobial resistance due to the fixing effect of biofilm and better survival of microorganisms in the presence of nutrient substrate in the so-called “protein crown” (inner layer of biofilm). It is emphasized that bacteria possessing mucolytic and proteolytic enzymes, in particular, representatives of the genus *Vibrio* and *Pseudomonadaceae*, are particularly active in biofilms, which aggravates the share of these pathogens in the

structure of modern acute intestinal infections and food poisoning. Examples are given that ingestion of such complexes in the human gastrointestinal tract can cause an abnormally acute response of the mucosal immune system, which in turn can be a trigger factor of the polyclonal response underlying atopy. The data on the possibility of microplastic biofilms contaminating fish and seafood, primarily obtained in aqua- and mariculture, toxins of cyanobacteria dangerous for humans in low doses are presented.

Taking into account the described nature of microbiological risks associated with contamination of foodstuffs and other objects of the food chain with micro- and nanoplastic particles associated with microbial biofilms and the reality of direct and indirect harm to human health caused by them, the review formulates the necessity of substantiation of preventive countermeasures and consumer protection, and gives specific examples of their implementation in the food industry.

Keywords: microplastics; microorganisms; bacterial toxins; biofilms; food products; food toxic infections

For citation: Markova Yu.M., Smotina Yu.V., Bykova I.B., Polyana A.S., Stetsenko V.V., Efimochkina N.R., Sheveleva S.A. Formation of biofilms on microplastics in the food chain and their role as vectors of transfer of pathogens of food poisoning (literature review, part 2). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2025; 104(5): 621–630. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-621-630> <https://elibrary.ru/cbmqdz> (In Russ.)

For correspondence: Yulia V. Smotrina, e-mail: yukorotkevich@gmail.com

Contribution. Markova Yu.M., Smotrina Yu.V. — data collection and processing, writing text, editing; Bykova I.B., Polyana A.S., Stetsenko V.V. — data collection and processing; Efimochkina N.R. — writing text, editing; Sheveleva S.A. — conception of the study, writing text, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. This work was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research project of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation No FGMF-2023-0005.

Received: November 15, 2024 / Revised: March 7, 2025 / Accepted: March 26, 2025 / Published: June 27, 2025

Введение

Загрязнение окружающей среды пластиком приобрело характер глобальной проблемы. Общее количество пластика, произведённого в мире за период с 1950 по 2021 г., находящегося в использовании, выброшенного в окружающую среду, а также утилизированного, оценивается в 11 млн тонн, а к 2060 г. прогнозируется увеличение этого объёма до 1 млрд тонн [1]. При определённых условиях и по прошествии времени пластики разрушаются с образованием частиц, вред от которых не уменьшается, а в некоторых случаях даже увеличивается. Так, частицы микропластика (МП < 5 мм) и нанопластика (НП < 1000 нм) относятся к естественным загрязнителям воды. Они легко мигрируют из наземной среды в водную и наоборот, являясь переносчиками различных микробов, в том числе патогенных и условно патогенных, в составе своих биоплёнок, что угрожает здоровью людей, безопасности фауны и флоры. На сегодняшний день в биоплёнке, покрывающей пластик, обнаружено более 30 таксонов патогенов человека, аквакультурных животных и растений наряду с условно патогенными бактериями. А мобильность и относительная долговечность вещества МП в сочетании с замкнутыми условиями аквакультурных плантаций делают пластиковые частицы питательной средой, угрожающей отрасли аквакультуры [2].

Исследователи полагают, что МП и НП легко включают в пищевую цепочку, рано или поздно достигающую организма человека. Так, частицы МП и НП обнаруживаются в питьевой воде, морской соли, рыбопродуктах и продукции аквакультуры. Пищевые продукты других категорий (мёд, сахар, пиво и др.) также могут содержать МП [3].

Формирование биоплёнки является одной из распространённых стратегий выживания бактерий в стрессовых условиях окружающей среды. На абиотических поверхностях оборудования предприятий пищевой отрасли патогенные микроорганизмы пищевого происхождения образуют биоплёнки, способствующие их длительной сохранности и контаминации пищевых продуктов. Субстратами для прикрепления биоплёнок становятся дерево, стекло, нержавеющая сталь, резина, различные полимеры. Дисперсные частицы МП и НП также являются матриксом для формирования биоплёнок ассоциациями бактерий. Пути развития таких комплексов различны, но процессы взаимодействий частиц МП и НП с микроорганизмами в любом случае ведут к изменению всех участников ассоциации. В случае успешной колонизации МП и НП происходит образование биоплёнки, в которой действуют механизмы чувства кворума, ведущие к формированию новой экосистемы — пластисферы.

Биоплёнкообразование у микроорганизмов, контаминирующих пищевую продукцию

Биоплёнки с включением *L. monocytogenes* на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, рассматриваются как значимый путь персистенции патогенов и последующего загрязнения продуктов. В ряде исследований продемонстрирована способность *L. monocytogenes* адгезироваться и формировать биоплёнки на полистироле, применяемом для изготовления дренажных труб, политетрафторэтилене, используемом в конвейерных лентах в пищевой промышленности, полиэстере, служащем напольным герметиком. Однако степень адгезии *L. monocytogenes* к этим материалам различается в зависимости от типа [4]. *Pseudomonas* spp. могут сосуществовать с другими патогенами в биоплёнках, образуя смешанные матриксы, что делает их более устойчивыми и стабильными на поверхностях [5]. Примерно 50% штаммов сальмонелл, выделенных на птицефабриках, способны образовать биоплёнки на разных объектах — от пищевых продуктов до контактных поверхностей в зонах переработки, таких как алюминий, стекло, резина, пластики (нейлон, полистирол) [6].

Биоплёнки представляют собой ассоциированные с поверхностью консорциумы микроорганизмов, заключённые в защитный биополимерный матрикс. Такие микроорганизмы обладают отчётливыми фенотипическими отличиями от планктонных клеток, выращенных в бульонных культурах в лаборатории. У обитателей биоплёнок проявляются различия в метаболизме, изменения в физиологии клеток и, что очень важно, повышенная устойчивость к стрессу [7]. Одним из наиболее значимых условий выживания бактерий в биоплёнках является непрерывность поступления питательных веществ и поддержание необходимой их концентрации в окружающей среде. При истощении питательной среды и ограничении пространства в биоматриксе бактерии подвергаются естественным «запланированным стрессовым воздействиям (голоданию). В результате клетки в составе биоплёнок могут находиться в разном физиологическом состоянии: помимо клеток с активным метаболизмом обнаруживаются покоящиеся и жизнеспособные, но некультивируемые клетки (VBNC). К воздействиям, которые могут вызвать состояние VBNC, наряду с дефицитом питательных веществ относятся экстремальные значения температуры, pH, ультрафиолетовое облучение, токсичное воздействие химических веществ, колебания концентрации кислорода. При голодании у бактерий в первую очередь метаболизируются углеводы, затем пептиды, некоторые РНК, а ДНК, как правило, остаётся защищённой. Находясь в состоянии VBNC, бактерии снижают свою метаболическую активность

и теряют способность образовывать на плотных питательных средах колонии, что затрудняет их обнаружение с помощью обычных методов подсчёта на чашках. При этом, сохраняя ДНК, они не теряют жизнеспособности и могут восстанавливаться. Это приводит к недооценке общего количества жизнеспособных клеток в пищевых продуктах, экологических или клинических образцах и, таким образом, представляет риск для здоровья населения [8, 9]. В состоянии VBNC клетки способны уменьшаться в размерах и переходить от палочковидной к более сферической морфологии, ДНК также может быть сжата и окружена плотной цитоплазмой [10]. Дисперсия биоплёнки способствует распространению некультивируемых клеток. При благоприятных условиях эти клетки, переходя в культивируемое состояние, могут занимать разнообразные экологические ниши и в том числе формировать новые биоплёнки.

Биоплёнокообразование у микроорганизмов, контаминирующего оборудование, инвентарь, упаковку из пластика, используемые в пищевой промышленности

Полимерные материалы — полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), полистирол (ПС), поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилентерефталат (ПЭТ), тефлон (ПТФЭ) — широко используются в технологическом оборудовании пищевых производств (поверхности, инструменты, разделочные доски, шланги, прокладки, инвентарь) и для упаковки пищевых продуктов. При постоянном повторном использовании пластиковые поверхности и изделия из-за разрушения полимеров вследствие высокотемпературных и (или) механических воздействий, факторов старения и вымывания, ультрафиолетового облучения, низкого качества материала становятся шероховатыми, растрескиваются, образуя убежища для бактерий, и выделяют в окружающую среду микропластик (МП) и нанопластик (НП). Например, только с разделочных досок ежегодно воздействие МП на человека оценивается в 14,5–71,9 млн МП из полиэтилена и 79,4 млн МП из полипропилена в год [11]. Полимерные пищевые контейнеры в течение трёх минут микроволнового нагрева с 1 см² выделяют 4,22 млн частиц МП и 2,11 млрд частиц НП [10]. МП, распространяясь в пищевой цепи, может выступать в качестве переносчика патогенов человека из-за повышенной возможности образования биоплёнок за счёт увеличения площади поверхности для роста, многоэтапности и длительности процессов производства, повышения устойчивости патогенов при их ассоциации с биоплёнками на сложном оборудовании. В различных исследованиях сообщается о присутствии на частицах МП бактериальных возбудителей болезней с пищевым путём передачи. Так, *Campylobacter* spp. формируют биоплёнки на частицах ПЭ 0,33–2 мм, *Pseudomonas* spp. — на ПЭ, ПП, ПС; на МП обнаружены патогенные *C. perfringens*; микробиом пластисферы включает пищевые бактериальные патогены — *Vibrio* spp., *Cyanobacteria*, *E. coli*, *B. cereus*, *S. aureus*, *Salmonella enterica*, *E. coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes* [12–14]. *Hanpimer*, патогенная *Listeria monocytogenes*, персистирующая на перерабатывающем предприятии пищевой промышленности в биоплёнке на элементах оборудования (полый валик, трудно очищаемая деталь слайсера и т. п.), была идентифицирована и в пластисферном бактериальном сообществе на остатках ПЭ [12, 15]. *V. parahaemolyticus*, *V. cholerae* и *V. vulnificus* обитают преимущественно на поверхности частиц ПП и ПЭ, а *Vibrio* spp., как известно, являются основными микроорганизмами в ранней колонизации МП [13, 16]. Патогенная кишечная палочка также была обнаружена на остатках ПЭ и ПП. *B. cereus* выделен из пластикового мусора, накопление которого происходит в секторе упаковки пищевых продуктов [12, 16]. На предприятиях пищевой промышленности *сальмонеллы* способны прикрепляться и образовывать биоплёнки на оборудовании и поверхностях из пластика, особенно в зонах убоя, потрошения и переработки птицы,

где этому способствует идеальная для образования биоплёнок высокая влажность воздуха. В молочной промышленности практически на всех поверхностях технологических систем происходит образование биоплёнки *Staphylococcus aureus*, являющегося причиной вспышек болезней, связанных с употреблением в пищу молока и молочных продуктов [17]. Частым явлением в биоплёнках микроорганизмов бывает синергетическое взаимодействие. Это делает биоплёнки более устойчивыми, в том числе к дезинфицирующим средствам. Например, подобное взаимодействие выявлено у *Listeria monocytogenes* с несколькими штаммами *Enterococcus faecium* и *Enterococcus faecalis*; *Escherichia coli*, а также у штаммов *Burkholderia caryophylli* и *Ralstonia insidiosa*, которые были выделены из свеженарезанного продукта на пищевом предприятии [12].

Биоплёнки микроорганизмов, вызывающих порчу мяса, обнаруживали в шлангах и связанных с ними соединительных деталях на этапе мясопереработки. Для смывания остатков средств после дезинфекции часто используют воду из шлангов, и попадание биоплёнки с водой из такого шланга на обработанную поверхность, считающуюся чистой и безопасной, приводит к контаминации микроорганизмами пищевой продукции в течение всего времени производства [2, 18]. Предполагается, что изношенные шланги выделяют частицы МП, которые потом вместе с биоплёнками вновь загрязняют объекты окружающей среды на предприятии и могут скапливаться в имеющихся наружных повреждениях. Во избежание генерирования МП важно в условиях пищевого производства наряду с выбором режимов санитарной обработки и дезинфекции поверхностей устанавливать и контролировать сроки службы водяных шлангов и другого пластикового оборудования.

Особенности образования и микробный состав биоплёнок на поверхности МП (НП)

Методами рентгеноструктурного анализа обнаружено, что биоплёнки на МП имеют характерную структуру. МП покрыт белковым слоем (экокорона или белковой короной), который обладает наибольшим количеством связанных между собой узлов, но с более низкой средней длиной пути, диаметром сети и модульностью по сравнению с биоплёнкой на природных частицах. Метагеномным анализом также выявлены микропластические биоплёнки с характерным резистомом [19–21]. В частности, две условно патогенные для человека бактерии (*Pseudomonas monteilii*, *Pseudomonas mendocina*) и один растительный патоген (*Pseudomonas syringae*) обнаружены только в биоплёнках на МП и не обнаружены в биоплёнках, образующихся на природных субстратах [19].

Факторы, влияющие на образование биоплёнок на МП (НП)

Первым этапом формирования микробных биоплёнок является адгезия (прикрепление планктонных клеток микроорганизмов к поверхности). Различают первоначальную обратимую и необратимую адгезию. При обратной адгезии свободно плавающие микроорганизмы устанавливают первоначальный контакт с поверхностью за счёт электростатических сил, гидрофобных взаимодействий и (или) сил Ван-дер-Ваальса, а также используют поверхностные органеллы, в том числе пили и жгутики. Переход от обратной адгезии к необратимой связан уже с образованием ковалентных, ионных и водородных связей, которые закрепляют микроорганизмы на месте. В прикреплении также могут участвовать микробные поверхностные белки и адгезины [22–24]. Такие атрибуты микробных клеток, как гидрофобность клеточной поверхности, компоненты клеточных мембран (например, белки и липополисахариды), наличие поверхностных органелл (например, пили, жгутики, фимбрии), и выделяемые экзополисахариды играют значимую роль в активации

образования биоплёнок. Виды и штаммы бактерий различных генотипов и даже серотипов характеризуются различной способностью к биоплёнкообразованию, что свидетельствует об их эволюции в плане усиления формирования биоплёнок на основе различных генетических предпосылок [5]. Но на бактериальную адгезию и последующее биоплёнкообразование влияют и сами МП, например, такие свойства поверхности, как заряд, гидрофобность, шероховатость, рельеф, жёсткость и химический состав [25, 26]. Для частиц МП в жидких средах важным фактором является также плотность. МП легко становится хорошим субстратом для микробной колонизации благодаря небольшим размерам, гидрофобной и шероховатой поверхности и длительному периоду разложения, образуя отдельную экологическую единицу, называемую пластисферой [24].

Заряд поверхности играет важную роль в обеспечении силы связи между ней и бактериями. Электростатические силы являются одними из наиболее ранних взаимодействий, участвующих в прикреплении бактериальных клеток к поверхностям. Большинство бактериальных клеток заряжено отрицательно, что подтверждается измерениями дзета-потенциала, поэтому в целом поверхность МП с положительным зарядом более благоприятна для бактериальной адгезии, а с отрицательным — более устойчива [25]. Так, было показано, что изменение заряда поверхности ПЭ (модификация эпоксигруппы, содержащей мономер глицидилметакрилат, методом радиационно-индуцированной прививочной полимеризации — RIGP) приводило к изменению первичной адгезии и последующего биоплёнкообразования *Escherichia coli*. На положительно заряженной поверхности формировались плотные и однородные биоплёнки, тогда как сформированные на отрицательно заряженной поверхности биоплёнки были разреженными, неоднородными и грибовидными. При исследовании адгезии штаммов *Pseudomonas*, *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus* на поверхности плёнок с разным зарядом, полученных электростатической послойной сборкой, больше бактерий обнаруживали на положительно заряженной поверхности по сравнению с нейтральной и отрицательно заряженной [27]. Свойства отрицательного заряда, препятствующие адгезии *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*, были выявлены и при исследовании полиэлектролитных мультислойных материалов [28]. Однако имеются данные о способности микроорганизмов преодолевать электростатическое отталкивание и прочно связываться с отрицательно заряженными поверхностями благодаря таким поверхностным структурам, как пили, а также наличию липополисахарида [26].

Гидрофобность. После преодоления электростатического отталкивания межфазные взаимодействия стабилизируются преимущественным прилеганием гидрофобных функциональных групп на поверхности материала и гидрофобных молекул бактериальной клеточной стенки и внеклеточных органелл [5]. Показано, что в целом на умеренно гидрофобных материалах наблюдается более интенсивное биоплёнкообразование по сравнению с гидрофильными поверхностями [29, 30]. При исследовании адгезии *Escherichia coli* к поверхности ПС было выявлено, что твёрдая поверхность с умеренной смачиваемостью обеспечивала самый высокий уровень бактериальной адгезии по сравнению с чрезвычайно гидрофобными или гидрофильными поверхностями. Захваченный на границе раздела супергидрофобных поверхностей воздух препятствовал прямому контакту бактерий с поверхностью, что приводило к снижению адгезии. Супергидрофильная поверхность с отрицательным дзета-потенциалом характеризовалась ограниченным прикреплением бактерий из-за уменьшения гидрофобного взаимодействия и возможного отталкивающего взаимодействия между бактериями и поверхностью [31]. Показано, что наноразмерная шероховатость на поверхности ПЭ, увеличивающая гидрофобность поверхности и сформированная в результате фемтосекундной лазерной обработки, снижала адгезию *Escherichia coli*, однако не оказывала влияния на колонизацию *Staphylococcus*

aureus [32]. Также известно, что в водной среде колонизации микроорганизмов на поверхности полимеров предшествует этап адсорбции растворённых органических веществ с образованием кондиционирующего слоя, что может приводить к увеличению гидрофобности поверхности [33, 34].

Шероховатость. Адгезия микроорганизмов зависит как от размеров самой клетки, так и от топографических параметров поверхности. Шероховатость поверхности МП увеличивается при старении в условиях окружающей среды. В целом увеличение шероховатости поверхности способствует прикреплению бактерий благодаря увеличению площади контакта поверхности материала с бактериальными клетками, а также защите от сил смещения [26]. С другой стороны, топографические микрометровые и нанометровые структуры препятствуют образованию биоплёнок по сравнению с плоскими поверхностями из того же материала, а отдельные наноструктуры могут обеспечивать супергидрофобность, снижающую адгезию и биоплёнкообразование [25].

Было показано, что на поверхности четырёхмиллиметровых частиц из разных материалов бактериальные агломераты появлялись на участках пластика с неровностями. Пресноводный плесневый гриб *Acremonium strictum* интенсивно формировал биоплёнки на поверхности порошкового ПС диаметром от 50 до 200 мкм с шероховатой поверхностью, в то время как на более крупных (4 мм) и более гладких ПС частицах биоплёнки не покрывали всю поверхность, а представляли собой тонкий слой, сосредоточенный в основном в местах складок [35].

Химический состав МП. Важно также отметить, что многие пластмассы содержат добавки (красители, огнезащитные вещества, стабилизаторы, пластификаторы и др.), которые могут как уменьшать, так и усиливать биоплёнкообразование. Одним из трендов современности можно считать широкое использование биоразлагаемых полимеров на основе полимолочной кислоты (PLA) и полибутилен-адипат-терефталата (PBAT). Однако требуются исследования для оценки интенсивности биоплёнкообразования на таких материалах.

Плотность МП. Для МП, находящихся в жидких средах, важным свойством, определяющим биоплёнкообразование, является также плотность, влияющая на распределение частиц в толще жидкости. Так, в исследованиях способности аэробной бактерии *Pseudomonas aeruginosa* к биоплёнкообразованию на поверхности частиц разных видов МП с диаметром 3 мм было обнаружено слабое биоплёнкообразование на полимерах плотнее воды (ПС и политетрафторэтилен — ПТФЭ) из-за отслоения биоплёнки вследствие частых столкновений с дном или ограничения роста биоплёнки, вызванного низкой концентрацией кислорода. При этом биоплёнки интенсивно формировались на поверхностях МП из ПЭ и ПП, плотность которых схожа с плотностью воды, а ПЭ, обладающий относительно высокой гидрофобностью, характеризовался наилучшим прикреплением бактерий на начальной стадии формирования биоплёнки [36].

Свойства окружающей среды, безусловно, значимо влияют на образование биоплёнок. Температура на объектах пищевой промышленности может варьироваться в широких пределах: минус 18 °С в морозильных камерах, плюс 4 °С в холодильниках, от плюс 4 до плюс 15 °С в среде перерабатывающих предприятий, плюс 72 °С при пастеризации молока и выше плюс 100 °С при стерилизации и дезинфекции. Способность отдельных штаммов к формированию биоплёнок на поверхности ПС в условиях низких температур была установлена для *L. monocytogenes* (плюс 10 °С) и для *Salmonella enterica* серотипа *enteritidis* (плюс 3 °С) [37, 38]. Температура также может влиять на некоторые свойства поверхности микробных клеток (заряд, гидрофобность).

Концентрация и доступность питательных веществ. Известно, что на прикреплении бактерий и образование биоплёнок в пищевой промышленности, в том числе на пластиковых поверхностях, влияют компоненты пищевой матрицы. *Campylobacter jejuni* и *Campylobacter coli* на ПС образуют

больше биоплёнок, когда среда роста обогащена экссудатом куриного мяса, являющимся дополнительным источником питательных веществ, покрывающим и кондиционирующим поверхность. Аналогично на поверхностях из ПС биоплёнкообразованию *Salmonella* spp. и *Campylobacter* spp. способствовало использование «мясного сока» из свинины. Развитию двухвидовой биоплёнки *E. coli* и *Staphylococcus aureus* способствуют молочные и мясные экссудаты, обогащённые жирами, белками и углеводами; молочная лактоза улучшает образование биоплёнок у *Bacillus subtilis* и *S. aureus* [17]. При исследовании способности штаммов *Salmonella enterica* серовара Weltevreden формировать биоплёнки на поверхности ПС было установлено, что при культивировании в среде, разбавленной в 100 раз, по сравнению с неразбавленной средой (триптиказо-соевый бульон) большинство штаммов формировало биоплёнки интенсивнее.

Вид полимерного материала. Было выявлено, что уропатогенный штамм *E. coli* и *C. albicans* продуцировали значительно меньше биоплёнок при культивировании на ПП по сравнению с ПС [39]. В исследовании с использованием лабораторного инкубатора с пресной водой из реки были охарактеризованы таксономический состав и разнообразие бактерий и грибов на трёх типах пластика. Высокопроизводительное секвенирование показало, что α -разнообразие бактериальных сообществ на частицах ПЭ было выше, чем на полиэтиленовых и полипропиленовых листах. Структура бактериальных сообществ на МП отличалась от таковой на пластиковых листах. Однако у грибковых сообществ на разных типах пластика не наблюдалось разительных различий в α -разнообразии и таксономическом составе [3].

В исследовании изучалось биоплёнкообразование на частицах разного состава и размеров (шарики из ПС диаметром 106–125 или 355–425 мкм; шарики из ПЭ диаметром 125–250 или 250–500 мкм; стеклянные микросферы диаметром 355–420 мкм) в водной среде (пробы сточных вод и пресной речной воды) [2]. Так, было показано, что при инкубации в среде с высокой обменённостью (сточные воды) интенсивность биоплёнкообразования на пластиковых частицах разных типов и размеров не отличалась. Однако при инкубации в среде с невысокой численностью микроорганизмов плотность биоплёнок, образованных на стеклянных сферах и на крупных частицах ПС, была значительно ниже по сравнению с мелкими и крупными частицами ПЭ и мелкими частицами ПС.

При тестировании биоплёнкообразования штаммов, выделенных из образцов пресной воды (*Escherichia coli*, *Aeromonas sobria* и *Klebsiella pneumoniae*), на поверхности разных видов МП круглой формы размером 4 мм показано, что ПЭ высокого давления был лучшей поверхностью для образования бактериальных биоплёнок, за ним следовали ПЭ низкого давления и ПС, а на небольших фрагментах ПЭТ и ПП через три месяца наблюдали только прикреплённые бактерии [34].

Поэтапный процесс формирования биоплёнок на МП в водной среде отражён на рисунке (см. на вклейке).

«Сначала МП покрываются слоем белка, известным как экокороны или белковая корона. Позже бактерии постепенно колонизируют поверхность МП. В конечном итоге пластисфера охватывает множество разнообразных микроорганизмов, включая бактериальные пищевые патогены, такие как *Pseudomonas*, *Vibrio*, токсичные виды *Cyanobacteria*, *E. coli*, *C. perfringens*, *B. cereus*» [12].

Как видно, первыми прикрепляются типичные водные таксоны, в том числе состоящие из потенциально опасных для рыбы и человека патогенов (*Vibrio* spp., *Aeromonas* spp., *Cyanobacteria* spp.). В дальнейшем МП обрастают другими видами-колонизаторами водных и наземных позвоночных *Pseudomonas*, *E. coli*, *C. perfringens*, *B. cereus*. Очевидно, что *Vibrio* spp. являются ключевыми в ранней колонизации МП. При этом известно, что они часто обнаруживаются в пластисфере и являются основным компонентом её микробного сообщества [12].

В объектах аква- и марикультуры, где повышена концентрация органических веществ из-за искусственного кормления и высокой плотности посадки, условия для формирования биоплёнок на МП будут наиболее благоприятными.

Безусловно, это повышает риск поступления в ЖКТ рыбы МП с биоплёнками, образованными водными мукотическими бактериями, ослабления кишечного барьера и проникновения патогенов в мышечную ткань, особенно при несвоевременной эвентрации после вылова. Важно, что ещё в 1978 г. ВОЗ предупреждала о вероятности заражения ботулизмом от скуенно выращиваемой аквакультуры за счёт транслокации анаэробных *C. botulinum* [40].

Связь возбудителей пищевых токсикоинфекций и отравлений с биоплёнками на МП (НП) и их влияние на рост и токсинообразование у микроорганизмов

В литературе достаточно полно отражено экспериментальное изучение прямого токсического воздействия МП и НП на организм при их пероральном поступлении, тогда как о косвенных негативных эффектах, связанных с векторной функцией МП и прикреплением к их поверхности многочисленных видов бактерий, в том числе и возбудителей токсикоинфекций и пищевых отравлений, стали говорить лишь недавно. Как отмечено выше, при совокупности определённых факторов в окружающей среде происходит колонизация частиц МП и НП микроорганизмами с последующим образованием биоплёнок. И хотя есть исследования, показывающие токсичность МП как для автотрофных, так и для гетеротрофных бактерий (что связано с просачивающимися ядовитыми добавками органического происхождения [41]), количество питательного субстрата, обволакивающего пластиковые частицы, делает их привлекательными для колонизации. Существование комплекса «частица МП – микроб» доказано для многих бактерий, в том числе *Aeromonas*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Halomonas*, *Mycobacterium*, *Photobacterium* и *Shigella* spp., а также грибов [42]. При этом образуется своеобразная экосистема, состоящая из биоплёнок на пластике, в которой жизнедеятельность микроорганизмов продолжается. В работе [43] исследованы факторы, влияющие на рост связанной с МП биоплёнки (тип полимера, степень выветривания, качество исходной среды и др.). Анализировали пробы атмосферных осадков, неочищенной воды из водозаборов и коммунальных очистных сооружений. Для выявления живых организмов и количественной оценки плёнок использовали АТФ-тесты; состав биоплёнки оценивали с помощью метагеномного секвенирования. Полученные результаты показали, что рост биоплёнок наиболее выражен на ПВХ: уровни АТФ были в 6–12 раз выше по сравнению с другими полимерами. Частота встречаемости патогенных микроорганизмов, в том числе *Salmonella enterica* и энтеропатогенных *Escherichia coli*, доходила до 13,7%. В похожих исследованиях [13, 44] обнаружено, что частицы полистирола – и нано- (0,1 и 0,55 мкм), и микроразмерные (5 мкм) – ингибировали рост *E. coli*, но способствовали росту *B. cereus*.

Достаточно подробно описано биоплёнкообразование на микропластике у патогенов [45–47]. Замечено, что потенциально патогенные *Vibrio* spp. являются одними из преобладающих таксонов в биоплёнках пластисферы [48]. Чаше всего эти микроорганизмы колонизируют фрагменты ПЭ, ПП и ПС, действуя как пионеры: инициируют колонизацию микропластика и способствуют последующему прикреплению представителей других видов. *E. coli* была обнаружена на остатках ПП, ПЭ и ПЭТ [49], *Campylobacter* spp. и *Clostridium perfringens* – на микрочастицах ПЭ [47, 48].

Существуют исследования, в которых опосредованная роль частиц МП и НЧ как векторов показана не только для бактерий, но и для вирусов. Так, в [50] описано, что выживаемость SARS-CoV-2 при адгезии на полипропиленовых

поверхностях увеличивается более чем на 72 ч. Пролемонстрирована даже повышенная инфекционность SARS-CoV-2 при его присоединении к полистирольным МП. Это исследование показало, что сам вирус не меняется при взаимодействии с частицами, но адсорбция на МП изменяет путь его проникновения в клетки. В комплексе с МП вирус захватывается в процессе фагоцитоза и перемещается к эндолизомам, а не сливается с плазматической мембраной, после чего попадает в цитоплазму, как это происходит без ассоциации с МП.

Частицы МП и НП, находясь в системе пластисферы, также оказывают значительное влияние на бактерии, например, на их рост, экспрессию генов вирулентности и выработки токсинов и даже на морфологию [51]. Биоупленки-ассоциированные микроорганизмы часто физиологически отличаются от своих планктонных аналогов тем, что потенциально проявляют повышенную вирулентность. Так, для *A. hydrophyla* и *C. freundii* экспрессия шигаподобного токсина (*slt-II*) увеличилась более чем в два раза при адгезии к МП по сравнению с планктонными клетками [52]. При выращивании в биоупленке *V. cholerae* становится гиперинфекционным из-за сверхэкспрессии факторов вирулентности, таких как пилус (необходим для колонизации кишечника) и холерный токсин (ответственен за возникновение водянистой диареи) [22].

Недавнее исследование [53] показало, что *Helicobacter pylori* может образовывать биоупленки на поверхности полиэтиленовых МП. На опытах с мышами были смоделированы соответствующие условия. Отмечено, что комплекс «бактерия и частица МП» индуцировал более агрессивное и глубокое повреждение желудка и воспалительную реакцию модели. Исследователи не смогли определить достоверно, что конкретно стало причиной более тяжёлого состояния мышей — механическое повреждение от частиц МП или повышенная инфекционность, связанная с биоупленками МП, однако ясно, что комбинация изменила взаимодействие хозяина с патогеном и тем самым повысила патогенность [15].

Исследователи задаются вопросом, может ли адгезия микроорганизмов или их фрагментов к МП изменять способность иммунной системы распознавать и уничтожать патогены. В ряде работ установлено, что даже в отсутствие живых микроорганизмов их компоненты, выделяющиеся из мёртвых клеток, могут связываться с поверхностями МП и НП. По сути, эти частицы могут действовать не только как самостоятельные триггеры воспаления и нарушения барьера в пищеварительной системе и лёгких (усугубляя тем самым патологические реакции на загрязнённые ими пищевые продукты и вдыхаемые аллергены), но и как переносчики множества биологических молекул. При вдыхании или проглатывании таких прикреплённых антигенов последние были способны активировать иммунный ответ, который отличался от вызванного изолированными аллергенами [45, 49].

Другими микробными молекулами, способными адсорбироваться на поверхностях МП, являются антибиотические вещества. Показано, что тетрациклины, макролиды, фторхинолоны, хлорамфеникол и сульфаниламиды могут связываться с пластиком за счёт гидрофобных и электростатических сил. Следовательно, присутствие антибиотиков в биоупленках на МП может способствовать развитию устойчивости у окружающих бактерий и индуцировать перенос внехромосомной ДНК между бактериальными сообществами и разными видами [15, 54, 55].

Влияние биоупленок на МП (НП) на формирование устойчивости к противомикробным препаратам

По данным ФАО, только в 2019 г. на нужды растениеводства и сельскохозяйственного производства было израсходовано до 12,5 млн тонн пластика, а для пищевой упаковки — 37,2 млн тонн [59]. Исследования по обнаружению микропластика в пресноводной воде, в том числе реках, озёрах, лагунах, устьях рек, а также в очищенных сточных водах показали широкий диапазон его присутствия — от 0,003

до 2,6 г/л. Частицы пластика размером более 5 мкм обнаруживаются и в бутилированной воде, хотя и в меньших, но вполне детектируемых концентрациях — 0,4–11,4 мкг/л. Как уже доказано, частицы МП в водной среде являются подходящим субстратом для образования микробных биоупленок. Совершенно очевидно, что в биоупленках могут удерживаться живые бактерии и их фрагменты, в том числе ДНК. Биоупленки в таких случаях служат своеобразным сорбентом для генов резистентности к антибиотикам, генов мобильных элементов и даже для остатков антимикробных препаратов. Показано, что упленки на полиамиде и поливинилхлориде могут эффективно адсорбировать антибиотики, особенно тетрациклинового ряда, что коррелирует с преобладанием генов резистентности к тетрациклину *tetA*, *tetC*, *tetX*, *tetG* в адгезированных бактериях. Также существуют данные о наличии в объектах окружающей среды, связанной с производством креветок, генов резистентности к фторхинолонам *qnrS*, сульфаниламидам *sul1*, *sul2*, мультирезистентности TET-SFX-ERY-PEN, а в речной воде сельскохозяйственных районов — генов устойчивости к сульфонидам *sul1*, *sulA/folP-01*, эритромицину *ermF*, линкозамиду *lnuE*, антибиотикам бета-лактаминового ряда *blaTEM*, *blaVEB*, аминокликозидам *aadA13*, *APH(9)-Ia*, *APH(3')-VI*; *aadA16*, фосфомицину *fosK*; рифампицину *arr-5*; хлорамфениколу *cmx*; триметоприму *dfrA15*, фторхинолонам *qnrVC6*, а также *smeE*, отвечающих за множественную резистентность. Наибольшую озабоченность вызывает высоковирулентный холерный вибрион, способный длительно сохраняться в воде, прикрепляясь к частицам пластика [20, 57–60], поскольку патогенные бактерии с множественной антибиотикорезистентностью более распространены в пластисфере и содержат больше генов устойчивости к антибиотикам по сравнению с планктонными бактериями в водной среде. В образцах частиц ПЭТ — наиболее часто встречающегося в морепродуктах пластика — было обнаружено в 100–5000 раз больше генов антибиотикорезистентности, чем в образцах воды [56].

Поскольку МП и НП в основном обнаруживаются в воде и являются плавучими элементами, можно предположить их распространение на достаточно большие расстояния. Следовательно, это позволяет признать рыбное хозяйство в прибрежных зонах важным резервуаром генов резистентности и мобильных генных элементов, играющим решающую роль в их циркуляции. Горизонтальный обмен мобильными генами антибиотикорезистентности между филогенетическими видами и даже родами происходит намного быстрее именно на МП, чем между свободноплавающими клетками микроорганизмов [60–62].

Серьёзные пробелы в исследовании микропластиков и образующихся на нём соединений и биоупленок, а также использование многими сельскохозяйственными предприятиями речной воды для полива обуславливают риск попадания частиц пластика вместе с водой в овощи, особенно листовые. Вероятнее всего, значительную часть МП и НП, а вместе с тем и мобильные гены антибиотикорезистентности и ко-резистентности к тяжёлым металлам содержат креветки и морепродукты, выращенные в марикультуре.

Таким образом, факты присутствия в объектах окружающей среды продовольственного сектора значимых количеств МП и НП, данные о выявлении в составе их биоупленок патогенов, ДНК, кодирующей резистентность и МГЭ, свидетельствуют о существовании риска ускоренного трансмиссивного обмена детерминантами резистентности и ко-резистентности и, как следствие, о селекции возбудителей с множественной антимикробной устойчивостью [63].

Методы определения патогенов, адгезированных в биоупленках к МП

Обнаружение, идентификация и количественная оценка микробного сообщества, в том числе патогенных микроорганизмов, на поверхности МП (НП), так называемой пластисферы, требуют разностороннего подхода из-за

особенностей объектов исследования самих носителей (микроскопические размеры, неоднородность структур, полимерное разнообразие и др.) и микроорганизмов, ассоциированных с МП (НП) в виде биоплёнок. Биоплёнки, образуемые на МП и НП, структурно отличаются. На частицах МП, имеющих размер от 1 мкм до 5 мм [64], микроорганизмы колонизируют поверхность, образуя биоплёнки, в то время как частицы НП, имеющие меньший размер ($\sim \leq 1$ мкм) [65], зачастую инкапсулированы белком или органическими веществами, образующими уникальную экосистему. Поэтому микроорганизмы адгезируются непосредственно к ней, а не к частицам НП.

Анализ видового состава пластисферы предполагает подготовительные этапы (сбор образцов МП (НП), их отмывка, концентрирование) и этапы исследования непосредственно микробиома, выбор методов для которых определяется специфичностью детектируемых микроорганизмов. Для корректной оценки состава сообщества требуется тщательная предварительная обработка проб объектов окружающей среды, пищевых продуктов, поскольку содержание МП (НП) в них низкое — как внутри, так и на поверхности. Наиболее подходящим считается использование мембранных фильтров для отделения частиц МП (НЧ) от сопутствующих макропластиков, мезопластиков и других компонентов пробы, а также адгезированных на МП (НП) микроорганизмов от планктонных. Визуализировать адгезированные на МП (НП) микроорганизмы можно с помощью разных способов микроскопии: световой, сканирующей электронной, флуоресцентной [66, 67] и конфокальной лазерной сканирующей [68, 69]. Для оценки состава микробного сообщества непосредственно на носителях можно применять методы молекулярно-генетической идентификации, такие как секвенирование 16S рРНК, полногеномное секвенирование, метагеномика в комбинации с транскриптомикой, для чего надо использовать прямую экстракцию микробной ДНК из МП (НП). Это также позволяет одновременно изучать функциональные механизмы резистентности и токсинообразования, кодируемые у обсеменяющих МП (НП) бактерий [66, 70]. К рутинным методам относят полимеразную цепную реакцию (ПЦР), в том числе с помощью высокопроизводительных технологий чипов qPCR [66]. Для определения количества жизнеспособных клеток в пластисфере используются культуральные методы с предварительной экстракцией микробных клеток из биоплёнки на частицах МП (НП) и получением бактериальной суспензии при обработке ультразвуком, встряхивании или применении комбинации УЗИ и встряхивания [71].

В целом исследования в этой области значительно расширились благодаря вышеупомянутым технологиям, однако существует пробел в анализе и моделировании микробной колонизации как МП, так и НП в различных условиях окружающей среды. Поскольку МП и НП присутствуют в различных матрицах окружающей среды (воздух, вода, отложения, почва, пищевые продукты, ткани животных и человека и др.), выбор аналитической методологии определяется задачами исследований в каждом конкретном случае. Также до настоящего времени представляет сложность выявление взаимосвязи бактерий, присутствующих в биоплёнках МП (НП), с инфекционными болезнями человека. Это будет возможно при сравнении данных генотипирования возбудителей, изолированных от людей, полученных из микрофлоры биоплёнок МП (НП), и установлении их сходства на штаммовом уровне.

Профилактика образования биоплёнок в пищевой промышленности

Подходы к ингибированию бактериальных биоплёнок в пищевой промышленности имеют неодинаковую эффективность. К традиционным относят физический подход (механическая обработка), недостаток которого состоит в невозможности удаления всех бактериальных клеток и

всех микрочастиц, и химическую обработку (с использованием гипохлорита натрия, перекиси водорода, озона и надукусной кислоты), в некоторой степени способствующую уничтожению бактериальных клеток и ингибированию образования биоплёнок на МП (НП) [72], но при этом увеличивающую риски вторичного химического загрязнения пищевой продукции [73]. Для борьбы с инфекциями пищевой происхождения, распространяющимися из-за биоплёнок, постоянно разрабатываются новые методы, основанные на ингибировании бактериальной адгезии, обнаружении бактерий на ранней стадии, разрушении каркаса биоплёнки с переводом прикреплённых бактерий в чувствительные планктонные клетки [73]. Появились и новые, так называемые «зелёные» подходы к контролю образования биоплёнок патогенов. Рассматривается применение таких безопасных биохимических агентов, как эфирные масла, ферменты, биосурфактанты и др. [73, 74].

Эфирные масла проявляют бактериостатическую активность в отношении различных патогенов пищевого происхождения, обусловленную наличием в их составе терпенов, кислородсодержащих производных (фенол, альдегиды, кетоны, спирты, простые эфиры и углеводороды) и терпеноидов (ароматические соединения, эфиры алифатических кислот, фенольные соединения) [73]. Так, эфирное масло орегано (душицы), как и масло муррайи Кёнига, снижало образование биоплёнок у *Pseudomonas aeruginosa* [75]. Комбинация масел тимьяна и пачули значительно снижала жизнеспособность биоплёнок [76]; комбинации эфирных масел *C. cuminum* и *A. sativum* были эффективны в отношении планктонных и бесплётных форм *S. typhimurium* [77].

Ферменты и их смеси представляют интерес как средства профилактики образования биоплёнок за счёт разрушения нарушения структуры внеклеточного полимерного матрикса и физической целостности биоплёнки, в результате чего уменьшается адгезия [78]. Так, коммерческий препарат пептидазы Flavozyme ингибировал образование биоплёнок *S. typhimurium* и веротоксин-продуцирующей *E. coli* [74]; сериновые протеазы эффективно удаляли биоплёнки *Bacillus*, а полисахаридазы элиминировали биоплёнки *Pseudomonas fluorescens* [73].

Биосурфактанты — микробные метаболиты, обладающие способностью снижать межфазное натяжение и образование мицеллярной структуры [79]. Исследования показали, что биосурфактанты также обладают антимикробной антиадгезивной активностью, предотвращая прикрепление бактериальных клеток и образование биоплёнок на контактирующих с пищевыми продуктами поверхностях независимо от их зарядов [73]. Эффект подавления образования биоплёнок выявлен для *Bacillus subtilis* BVK006 и *S. aureus* ATCC 9144 в статических и проточных условиях [80], а снижении адгезии к ПС — для *L. monocytogenes* и *P. fluorescens* [81].

Формирование биоплёнок у патогенов пищевого происхождения, особенно у *Vibrio cholerae*, зависит от межклеточной коммуникации в кворуме. Поэтому меры, имеющие антикворумную направленность, например, ингибирование важной для этого процесса роевой подвижности, также могут быть использованы для предотвращения плёнокообразования. В частности, это обработка ферментными препаратами, эфирными маслами, дезинфицирующими препаратами [73]. Так, [82] обнаружили, что нанолипосомы, полученные путём инкапсулирования масла шалфея, проявляют антибактериальные свойства на поверхности контейнеров для молока. Микроразмерные сферы ZnO показывали антибактериальные свойства широкого спектра и антибиоплёночную активность, особенно в отношении *S. aureus*, *B. subtilis*, *E. coli*, *K. pneumonia* и *P. aeruginosa* [83].

Генетический подход может быть использован для контроля экспрессии генов, регулирующих бактериальную адгезию на ранней стадии, а также для ограничения экспрессии генов, участвующих в отделении и распространении бак-

терий на последнем этапе формирования биоплёнки [73]. Аденозинтрифосфат способен стимулировать лизис клеток и высвобождение внеклеточной ДНК, участвующей в адгезии клеток во время образования бактериальной биоплёнки [84]. Формирование биоплёнок у бактерий, таких как *L. monocytogenes*, определяется также подвижностью жгутиков и некоторыми факторами вирулентности. Эффект, препятствующий образованию биоплёнок, могут оказывать их антагонисты — пробиотики за счёт воздействия своих растворимых метаболитов. Так, установлено, что инактивированные *Lactobacillus* spp. могут быть использованы в качестве эффективных биологических средств для контроля биоплёнки *L. monocytogenes* в пищевой промышленности посредством ингибирования двигательной моторики и экспрессии различных генов-мишеней, связанных с патогенностью и образованием биоплёнок *L. monocytogenes* [85].

Всё это указывает на перспективность альтернативных подходов к контролю биоплёнок на макро- и микропластике в пищевой промышленности.

Заключение

Характер микробиологических рисков, связанных с загрязнением пищевых продуктов и других объектов пищевой цепи частицами МП, ассоциированными с микробными биоплёнками, обуславливает и прямой, и опосредованный вред для здоровья человека, проявляющийся в возможности развития болезней и отравлений, а также в дальнейшей глобализации антибиотикорезистентности и связанных с нею негативных последствий.

В связи с этим для обоснования превентивных мер противодействия и защиты людей необходимо изучение микробиологического риска комбинаций разных видов МП и НП, образующихся в пищевой промышленности из макропластиков-предшественников, с конкретными видами пищевых патогенов. Результаты этих исследований позволяют разработать способы минимизации образования биоплёнок на МП и НП в условиях производства и переработки продукции и предотвращения их попадания с пищей в организм человека.

Литература / References

- Kwon D. Three ways to solve the plastics pollution crisis. *Nature*. 2023; 616(7956): 234–7. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00975-5>
- Parrish K., Fahrnenfeld N.L. Microplastic biofilm in fresh- and wastewater as a function of microparticle type and size class. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2019; 5(3): 495–505. <https://doi.org/10.1039/C8EW00712H>
- Wang L., Tong J., Li Y., Zhu J., Zhang W., Niu L., et al. Bacterial and fungal assemblages and functions associated with biofilms differ between diverse types of plastic debris in a freshwater system. *Environ. Res.* 2021; 196: 110371. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110371>
- Mazaheri T., Cervantes-Huamán B.R.H., Bermúdez-Capdevila M., Ripolles-Avila C., Rodríguez-Jerez J.J. *Listeria monocytogenes* biofilms in the food industry: is the current hygiene program sufficient to combat the persistence of the pathogen? *Microorganisms*. 2021; 9(1): 181. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010181>
- Carrascosa C., Raheem D., Ramos F., Saraiva A., Raposo A. Microbial biofilms in the food industry — a comprehensive review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(4): 2014. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042014>
- Merino L., Procura F., Trejo F.M., Bueno D.J., Golowczyc M.A. Biofilm formation by *Salmonella* sp. in the poultry industry: Detection, control and eradication strategies. *Food Res. Int.* 2019; 119: 530–40. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.024>
- Jahid I.K., Ha S.D. The paradox of mixed-species biofilms in the context of food safety. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2014; 13(5): 990–1011. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12087>
- Li L., Mendis N., Trigui H., Oliver J.D., Faucher S.P. The importance of the viable but non-culturable state in human bacterial pathogens. *Front. Microbiol.* 2014; 5: 258. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00258>
- Kim J.S., Chowdhury N., Yamasaki R., Wood T.K. Viable but non-culturable and persistence describe the same bacterial stress state. *Environ. Microbiol.* 2018; 20(6): 2038–48. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14075>
- Hussain K.A., Romanova S., Okur I., Zhang D., Kuebler J., Huang X., et al. Assessing the release of microplastics and nanoplastics from plastic containers and reusable food pouches: implications for human health. *Environ. Sci. Technol.* 2023; 57(26): 9782–92. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01942>
- Yadav H., Khan M.R.H., Quadri M., Rusch K.A., Mondal P.P., Orr M., et al. Cutting boards: an overlooked source of microplastics in human food? *Environ. Sci. Technol.* 2023; 57(22): 8225–35. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00924>
- Tavelli R., Callens M., Grootaert C., Abdallah M.F., Rajkovic A. Foodborne pathogens in the plastisphere: Can microplastics in the food chain threaten microbial food safety? *Trends Food Sci. Technol.* 2022; 129(11): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.021>
- Cocca M., Di Pace E., Errico M.E., Gentile G., Montarsolo A., Mossotti R., et al. *Proceedings of the 2nd International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea*. Springer Nature; 2020: 112–20.
- Murphy L., Germaine K., Dowling D.N., Kakouli-Duarte T., Cleary J. Association of potential human pathogens with microplastics in freshwater systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea*. Springer Nature; 2020: 112–20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45909-3_19
- Nowak J., Visnovsky S.B., Pitman A.R., Cruz C.D., Palmer J., Fletcher G.C., et al. Biofilm formation by *Listeria monocytogenes* 15G01, a persistent isolate from a seafood-processing plant, is influenced by inactivation of multiple genes belonging to different functional groups. *Appl. Environ. Microbiol.* 2021; 87(10): e02349–20. <https://doi.org/10.1128/AEM.02349-20>
- Schmid P.J., Maitz S., Kittinger C. *Bacillus cereus* in packaging material: molecular and phenotypical diversity revealed. *Front. Microbiol.* 2021; 12: 698974. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.698974>
- Olanbiwoninu A.A., Popoola B.M. Biofilms and their impact on the food industry. *Saudi J. Biol. Sci.* 2023; 30(2): 103523. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103523>
- Wagner E.M., Pracer N., Thalgueter S., Fischel K., Rammer N., Pospíšilová L., et al. Identification of biofilm hotspots in a meat processing environment: Detection of spoilage bacteria in multi-species biofilms. *Int. J. Food Microbiol.* 2020; 328: 108668. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108668>
- Wu X., Pan J., Li M., Li Y., Bartlam M., Wang Y. Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm. *Water Res.* 2019; 165: 114979. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114979>
- Pham D.N., Clark L., Li M. Microplastics as hubs enriching antibiotic-resistant bacteria and pathogens in municipal activated sludge. *J. Hazard. Mater. Lett.* 2021; 2: 100014. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100014>
- Gallego-Hernandez A.L., DePas W.H., Park J.H., Teschler J.K., Hartmann R., Jeckel H., et al. Upregulation of virulence genes promotes *Vibrio cholerae* biofilm hyperinfectivity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2020; 117(20): 11010–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916571117>
- Zhang Y., Wu Q., Forsythe S., Liu C., Chen N., Chengcheng L., et al. The cascade regulation of small RNA and quorum sensing system: Focusing on biofilm formation of foodborne pathogens in food industry. *Food Bioscience*. 2023; 52(11): 102472. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102472>
- Moyal J., Dave P.H., Wu M., Ghannadi S.K., Brar S.K., Zhong H., et al. Impacts of biofilm formation on the physicochemical properties and toxicity of microplastics: a concise review. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 2023; 261(1): 8. <https://doi.org/10.1007/s44169-023-00035-z>
- He S., Jia M., Xiang Y., Song B., Xiong W., Cao J., et al. Biofilm on microplastics in aqueous environment: Physicochemical properties and environmental implications. *J. Hazard. Mater.* 2022; 424(Pt. B): 127286. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127286>
- Song F., Koo H., Ren D. Effects of material properties on bacterial adhesion and biofilm formation. *J. Dent. Res.* 2015; 94(8): 1027–34. <https://doi.org/10.1177/0022034515587690>
- Zheng S., Bawazir M., Dhall A., Kim H.E., Heo L., Heo J., et al. Implication of surface properties, bacterial motility, and hydrodynamic conditions on bacterial surface sensing and their initial adhesion. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2021; 9: 643722. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.643722>
- Zhu X., Jańczewski D., Guo S., Lee S.S., Parra Velandía F.J., Teo S.L., et al. Polyion multilayers with precise surface charge control for antifouling. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015; 7(1): 852–61. <https://doi.org/10.1021/am507371a>
- Guo S., Kwek M.Y., Toh Z.Q., Pranantyo D., Kang E.T., Loh X.J., et al. Tailoring polyelectrolyte architecture to promote cell growth and inhibit bacterial adhesion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018; 10(9): 7882–91. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b00666>
- De-la-Pinta I., Cobos M., Ibarretxe J., Montoya E., Eraso E., Guraya T., et al. Effect of biomaterials hydrophobicity and roughness on biofilm development. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2019; 30(7): 77. <https://doi.org/10.1007/s10856-019-6281-3>
- Saeki D., Nagashima Y., Sawada I., Matsuyama H. Effect of hydrophobicity of polymer materials used for water purification membranes on biofilm formation dynamics. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2016; 506: 622–8. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.07.036>
- Yuan Y., Hays M.P., Hardwidge P.R., Kim J. Surface characteristics influencing bacterial adhesion to polymeric substrates. *RSC Advances*. 2017; 7(23): 14254–61. <https://doi.org/10.1039/C7RA01571B>
- Schwibbert K., Menzel F., Epperlein N., Bonse J., Krüger J. Bacterial adhesion on femtosecond laser-modified polyethylene. *Materials (Basel)*. 2019; 12(19): 3107. <https://doi.org/10.3390/ma12193107>

Review article

33. Rummel C.D., Lechtenfeld O.J., Kallies R., Benke A., Herzsprung P., Rynek R., et al. Conditioning film and early biofilm succession on plastic surfaces. *Environ. Sci. Technol.* 2021; 55(16): 11006–18. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07875>
34. Bhagwat G., O'Connor W., Grainge I., Palanisami T. Understanding the fundamental basis for biofilm formation on plastic surfaces: role of conditioning films. *Front. Microbiol.* 2021; 12: 687118. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.687118>
35. Wu C., Tanaka K., Tani Y., Bi X., Liu J., Yu Q. Effect of particle size on the colonization of biofilms and the potential of biofilm-covered microplastics as metal carriers. *Sci. Total. Environ.* 2022; 821: 153265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153265>
36. Ayush P.T., Ko J.H., Oh H.S. Characteristics of initial attachment and biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa* on microplastic surfaces. *Appl. Sci.* 2022; 12(10): 5245. <https://doi.org/10.3390/app12105245> <https://elibrary.ru/cryaon>
37. Nguyen Trang P., Thi Anh Ngoc T., Masuda Y., Hohjoh K.I., Miyamoto T. Biofilm formation from *Listeria monocytogenes* isolated from pangasius fish-processing plants. *J. Food Prot.* 2023; 86(3): 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100044>
38. Rodrigues L.B., Webber B., Levandowski R., Gehlen S.S., Santos L.R.D., Pilotto F., et al. Biofilm formation by *Salmonella enteritidis* at different incubation temperatures. *Acta Scientiae Veterinariae.* 2018; 47(1): 1654. <https://doi.org/10.22456/1679-9216.89414>
39. Slettengren M., Mohanty S., Kamolvit W., van der Linden J., Brauner A. Making medical devices safer: impact of plastic and silicone oil on microbial biofilm formation. *J. Hosp. Infect.* 2020; 106(1): 155–62. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.07.011>
40. Microbiological aspects of food hygiene. Report of a WHO Expert Committee with the participation of FAO. *World Health Organ. Tech. Rep. Ser.* 1976; (598): 1–103.
41. Cholewińska P., Moniuszko H., Wojnarowski K., Pokorny P., Szeligowska N., Dobicki W., et al. The occurrence of microplastics and the formation of biofilms by pathogenic and opportunistic bacteria as threats in aquaculture. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19(13): 8137. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138137>
42. Du F., Cai H., Zhang Q., Chen Q., Shi H. Microplastics in take-out food containers. *J. Hazard. Mater.* 2020; 399: 122969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122969>
43. Jiang C., Almuhtaram H., McKie M.J., Andrews R.C. Assessment of biofilm growth on microplastics in freshwater using a passive flow-through system. *Toxics.* 2023; 11(12): 987. <https://doi.org/10.3390/toxics11120987>
44. Yi X., Li W., Liu Y., Yang K., Wu M., Zhou H. Effect of polystyrene microplastics of different sizes to *Escherichia coli* and *Bacillus cereus*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2021; 107(4): 626–32. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03215-6>
45. Cox K.D., Covernton G.A., Davies H.L., Dower J.F., Juanes F., Dudas S.E. Human Consumption of Microplastics. *Environ. Sci. Technol.* 2019; 53(12): 7068–74. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
46. Jiang P., Zhao S., Zhu L., Li D. Microplastic-associated bacterial assemblages in the intertidal zone of the Yangtze Estuary. *Sci. Total. Environ.* 2018; 624: 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.105>
47. Kelly J.J., London M.G., Oforji N., Ogunsola A., Hoellein T.J. Microplastic selects for convergent microbiomes from distinct riverine sources. *Freshw. Sci.* 2020; 39(2): 281–91. <https://doi.org/10.1086/708934>
48. Götz G., Kittler S., Malakauskas M., Alter T. Survival of campylobacter in the food chain and the environment. *Curr. Clin. Microbiol. Rep.* 2018; 5(2): 126–34. <https://doi.org/10.1007/s40588-018-0092-z> <https://elibrary.ru/tlzhzv>
49. Bowley J., Baker-Austin C., Porter A., Hartnell R., Lewis C. Oceanic hitchhikers – assessing pathogen risks from marine microplastic. *Trends. Microbiol.* 2021; 29(2): 107–16. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.06.011>
50. Da Silva R.T., de Souza Grilo M.M., Pimentel T.C., de Lucena F.A., Schaffner D.W., de Souza Pedrosa G.T., et al. An overview of foodborne viruses and SARS-CoV-2 in foods and food-contact surfaces: survival, transfer, surrogates use, and mathematical modeling. *Curr. Opin. Food Sci.* 2024; 55: 101119. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101119>
51. Khan A., Jia Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience.* 2023; 26(2): 106061. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>
52. Thomas S.G., Glover M.A., Parthasarathy A., Wong N.H., Shipman P.A., Hudson A.O. Expression of a Shiga-like toxin during plastic colonization by two multidrug-resistant bacteria, *Aeromonas hydrophila* RIT668 and *Citrobacter freundii* RIT669, isolated from endangered turtles (*Clemmys guttata*). *Microorganisms.* 2020; 8(8): 1172. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081172>
53. Tong X., Li B., Li J., Li L., Zhang R., Du Y., et al. Polyethylene microplastics cooperate with *Helicobacter pylori* to promote gastric injury and inflammation in mice. *Chemosphere.* 2022; 288(Pt. 2): 132579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132579>
54. Maruzani R., Sutton G., Nocerino P., Marvasi M. Exopolymeric substances (EPS) from *Salmonella enterica*: polymers, proteins and their interactions with plants and abiotic surfaces. *J. Microbiol.* 2019; 57(1): 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12275-019-8353-y>
55. FAO. *Assessment of agricultural plastics and their sustainability – a call for action.* Rome; 2021.
56. Zhang Y., Lu J., Wu J., Wang J., Luo Y. Potential risks of microplastics combined with superbugs: Enrichment of antibiotic resistant bacteria on the surface of microplastics in mariculture system. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020; 187: 109852. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109852>
57. Lu J., Zhang Y., Wu J., Luo Y. Effects of microplastics on distribution of antibiotic resistance genes in recirculating aquaculture system. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019; 184: 109631. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109631>
58. Wang Y., Wang X., Li Y., Li J., Wang F., Xia S., et al. Biofilm alters tetracycline and copper adsorption behaviors onto polyethylene microplastics. *Chem. Eng. J.* 2020; 392: 123808. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123808>
59. Yang Y., Liu G., Song W., Ye C., Lin H., Li Z., et al. Plastics in the marine environment are reservoirs for antibiotic and metal resistance genes. *Environ. Int.* 2019; 123: 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.061>
60. Wang S., Xue N., Li W., Zhang D., Pan X., Luo Y. Selectively enrichment of antibiotics and ARGs by microplastics in river, estuary and marine waters. *Sci. Total. Environ.* 2020; 708: 134594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134594>
61. Chen C.Q., Zheng L., Zhou J.L., Zhao H. Persistence and risk of antibiotic residues and antibiotic resistance genes in major mariculture sites in Southeast China. *Sci. Total. Environ.* 2017; 580: 1175–84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.075>
62. Imran M., Das K.R., Naik M.M. Co-selection of multi-antibiotic resistance in bacterial pathogens in metal and microplastic contaminated environments: An emerging health threat. *Chemosphere.* 2019; 215: 846–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.114>
63. Khare T., Mathur V., Kumar V. Agro-ecological microplastics enriching the antibiotic resistance in aquatic environment. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 2024; 37: 100534. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100534> <https://elibrary.ru/iptfsk>
64. Frias J.P.G.L., Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* 2019; 138: 145–7. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
65. Gigault J., Halle A.T., Baudrimont M., Pascal P.Y., Gauffre F., Phi T.L., et al. Current opinion: what is a nanoplastic? *Environ. Pollut.* 2018; 235: 1030–4. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
66. Bartkova S., Kahru A., Heinlaan M., Scheler O. Techniques used for analyzing microplastics, antimicrobial resistance and microbial community composition: a mini-review. *Front. Microbiol.* 2021; 12: 603967. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.603967>
67. Arias-Andres M., Klümper U., Rojas-Jimenez K., Grossart H.P. Microplastic pollution increases gene exchange in aquatic ecosystems. *Environ. Pollut.* 2018; 237: 253–61. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.058>
68. Hossain M.R., Jiang M., Wei Q., Leff L.G. Microplastic surface properties affect bacterial colonization in freshwater. *J. Basic Microbiol.* 2019; 59(1): 54–61. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800174>
69. Jonkman J., Brown C.M., Wright G.D., Anderson K.I., North A.J. Tutorial: guidance for quantitative confocal microscopy. *Nat. Protoc.* 2020; 15(5): 1585–611. <https://doi.org/10.1038/s41596-020-0313-9>
70. Pathak A., Jaswal R., Chauhan A. Genomic characterization of a mercury resistant *Arthrobacter* sp. H-02-3 reveals the presence of heavy metal and antibiotic resistance determinants. *Front. Microbiol.* 2020; 10: 3039. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.03039>
71. Stevenson E.M., Buckling A., Cole M., Lindeque P.K., Murray A.K. Culturing the Plasticsphere: comparing methods to isolate culturable bacteria colonising microplastics. *Front. Microbiol.* 2023; 14: 1259287. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1259287>
72. Yu T., Ma M., Sun Y., Xu X., Qiu S., Yin J., et al. The effect of sublethal concentrations of benzalkonium chloride on the LuxS/AI-2 quorum sensing system, biofilm formation and motility of *Escherichia coli*. *Int. J. Food Microbiol.* 2021; 353: 109313. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109313>
73. Zhu T., Yang C., Bao X., Chen F., Guo X. Strategies for controlling biofilm formation in food industry. *Grain Oil. Sci. Technol.* 2022; 5(4): 179–86. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.06.003>
74. Nahar S., Jeong H.L., Kim Y., Ha A.J., Roy P.K., Park S.H., et al. Inhibitory effects of Flavourzyme on biofilm formation, quorum sensing, and virulence genes of foodborne pathogens *Salmonella Typhimurium* and *Escherichia coli*. *Food Res. Int.* 2021; 147: 110461. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110461>
75. Ganesh P.S., Vittal R.R. *In vitro* antibiofilm activity of *Murraya koenigii* essential oil extracted using supercritical fluid CO₂ method against *Pseudomonas aeruginosa* PAO1. *Nat. Prod. Res.* 2015; 29(24): 2295–8. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1004673>
76. Vázquez-Sánchez D., Cabo M.L., Rodríguez-Herrera J.J. Antimicrobial activity of essential oils against *Staphylococcus aureus* biofilms. *Food Sci. Technol. Int.* 2015; 21(8): 559–70. <https://doi.org/10.1177/1082013214553996>
77. Hakimi Alni R., Ghorban K., Dadmanesh M. Combined effects of *Allium sativum* and *Cuminum cyminum* essential oils on planktonic and biofilm forms of *Salmonella typhimurium* isolates. *J. Biotech.* 2020; 10(7): 315. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02286-2>
78. Kaur A., Soni S.K., Vij S., Rishi P. Cocktail of carbohydrases from *Aspergillus niger*: an economical and eco-friendly option for biofilm clearance from biopolymer surfaces. *AMB Express.* 2021; 11(1): 22. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01183-y>
79. Salisbury A.M., Mullin M., Foulkes L., Chen R., Percival S.L. The ability of a concentrated surfactant gel to reduce an aerobic, anaerobic and multispecies bacterial biofilm *in vitro*. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2021; 1323: 149–57. https://doi.org/10.1007/5584_2020_609
80. Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Korshunova I.O., Stukova G.I., Krivonuchko A.V. Diverse effects of a biosurfactant from *Rhodococcus ruber* IEGM 231 on the adhesion of resting and growing bacteria to polystyrene. *AMB Express.* 2016; 6(1): 14. <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0186-z>
81. De Araujo L.V., Guimarães C.R., da Silva Marquita R.L., Santiago V.M., de Souza M.P., Nitschke M., et al. Rhamnolipid and surfactin: Anti-adhesion/antibiofilm and antimicrobial effects. *Food Control.* 2015; 63: 171–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.11.036>

82. Cui H., Zhou H., Lin L. The specific antibacterial effect of the Salvia oil nanoliposomes against *Staphylococcus aureus* biofilms on milk container. *Food Control*. 2016; 61: 92–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.034>
83. Patrinoiu G., Calderón-Moreno J.M., Chiffiriuc C.M., Saviuc C., Birjega R., Carp O. Tunable ZnO spheres with high anti-biofilm and antibacterial activity via a simple green hydrothermal route. *J. Colloid. Interface. Sci.* 2016; 462: 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.09.059>
84. Qiu H., Pu F., Liu Z., Deng Q., Sun P., Ren J., et al. Depriving bacterial adhesion-related molecule to inhibit biofilm formation using CeO₂-decorated metal-organic frameworks. *Small*. 2019; 15(36): e1902522. <https://doi.org/10.1002/sml.201902522>
85. Hossain M.I., Mizan M.F.R., Roy P.K., Nahar S., Toushik S.H., Ashrafudoulla M., et al. *Listeria monocytogenes* biofilm inhibition on food contact surfaces by application of postbiotics from *Lactobacillus curvatus* B.67 and *Lactobacillus plantarum* M.2. *Food Res. Int.* 2021; 148: 110595. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110595>

Сведения об авторах

Маркова Юлия Михайловна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биобезопасности и анализа нутримикробиома ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия. E-mail: yulia.markova.ion@gmail.com

Смотрина Юлия Владимировна, мл. науч. сотр. лаб. биобезопасности и анализа нутримикробиома ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия

Быкова Ирина Борисовна, науч. сотр. лаб. биобезопасности и анализа нутримикробиома ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия

Полянина Анна Сергеевна, мл. науч. сотр. лаб. биобезопасности и анализа нутримикробиома ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия

Стеценко Валентина Валерьевна, науч. сотр. лаб. биобезопасности и анализа нутримикробиома ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия

Ефимочкина Наталья Рамазановна, доктор биол. наук, зам. директора по научной работе ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия

Шевелёва Светлана Анатольевна, доктор мед. наук, зав. лаб. биобезопасности и анализа нутримикробиома ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», 109240, Москва, Россия. E-mail: sheveleva@ion.ru

Information about the authors

Yulia M. Markova, senior researcher at the Laboratory of Biosafety and Nutrimicrobiome Analysis of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2631-6412>

Yulia V. Smotrina, Researcher at the Laboratory of Biosafety and Nutrimicrobiome Analysis of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8842-0525>

Irina B. Bykova, Junior Researcher at the Laboratory of Biosafety and Nutrimicrobiome Analysis of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7288-312X>

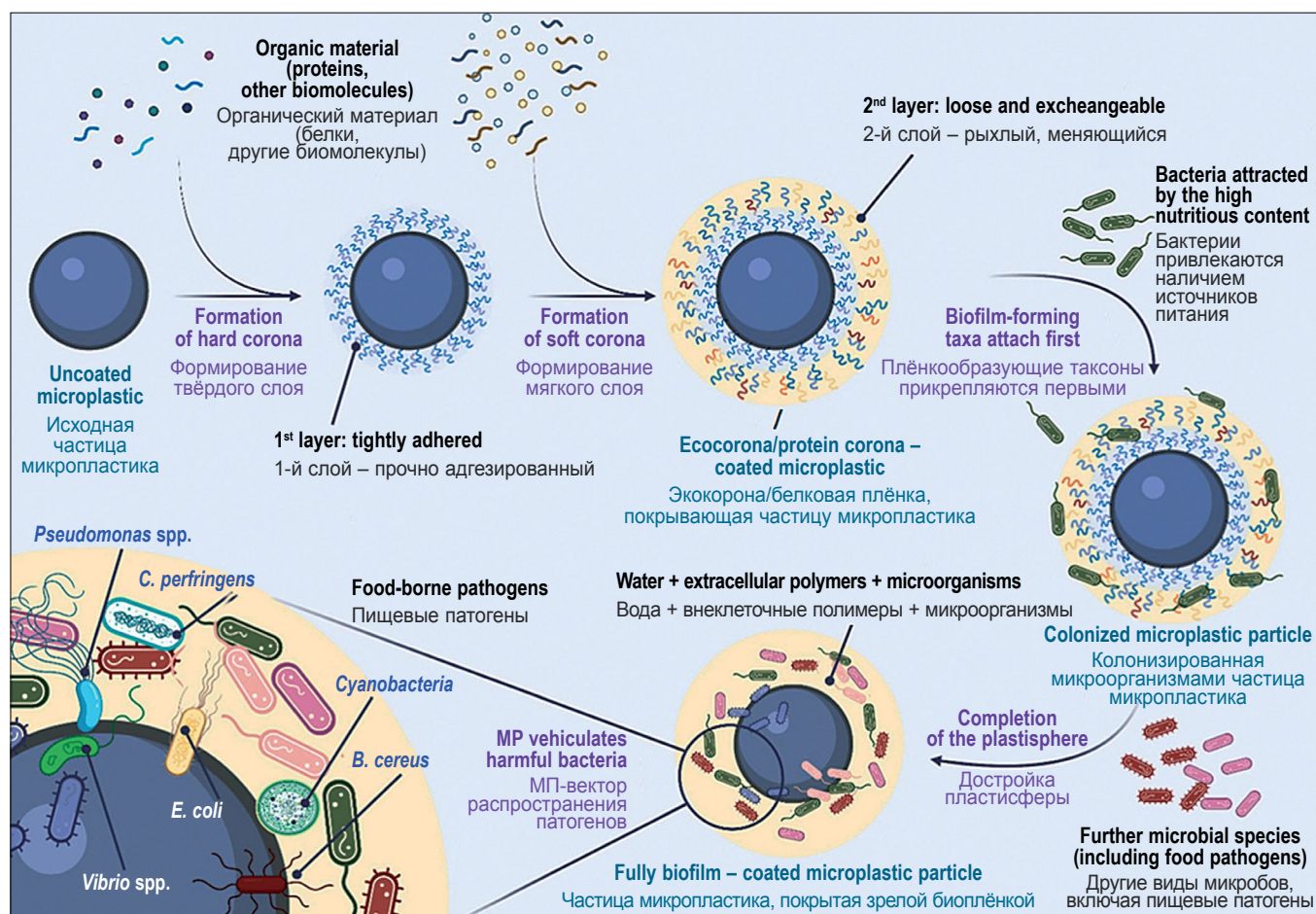
Anna S. Polyagina, Researcher at the Laboratory of Biosafety and Nutrimicrobiome Analysis of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2766-7716>

Valentina V. Stetsenko, Junior Researcher at the Laboratory of Biosafety and Nutrimicrobiome Analysis of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6470-171X>

Natalya R. Efimochkina, DSc (Biology), Deputy director for scientific work of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9071-0326>

Svetlana A. Sheveleva, DSc (Medicine), Head of the Laboratory of Biosafety and Nutrimicrobiome of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, 109240, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5647-9709>

К статье Ю.М. Марковой и соавт.
To the article by Yulia M. Markova et al.



Процесс формирования микробных биоплёнок на поверхности микропластика (МП) в водной среде (цит. по [12]).
Process of the formation of the microbial biofilms on the surface of microplastics (MPs) in aquatic environment (quoted from [12]).