



Перспективы использования меланина в качестве антибактериального агента потребительской упаковки

Я.В. Уразова*, Е.Д. Рожнов**✉, М.Н. Школьников**

*Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Российская Федерация

**Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Меланины, обладая высокой физиологической активностью и функциональными свойствами, в числе прочего представляют интерес как антибактериальные агенты в составе пищевых систем и потребительской упаковки продуктов. Проведенная работа была посвящена изучению противомикробной активности меланина из лузги гречихи в отношении ряда микроорганизмов бактериальной микрофлоры сыров промышленного производства. Объектами исследования являлись очищенный меланин, полученный из лузги гречихи, и тест-культуры *Penicillium roqueforti*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus* и *Lactobacillus plantarum*. В ходе работы использовали диско-диффузионный метод и культивирование тест-культур в присутствии меланина. Статистическую обработку результатов исследований проводили с применением пакета Statistica 10. В ходе проведенного анализа установлена антимикробная активность меланина в отношении грамположительных бактерий *Bacillus subtilis* B-12587 и *Penicillium roqueforti* F-1311, в максимальной исследуемой концентрации зона лизиса при культивировании клеток *Bacillus subtilis* B-12587 составляет $26,4 \pm 0,2$ мм, что в 1,28 раза больше зоны лизиса клеток *Penicillium roqueforti* F-1311, в 1,43 раза больше зоны лизиса клеток *Bacillus pumilus* B-7308 и в 1,58 раза больше зоны лизиса клеток *Lactobacillus plantarum* B-3242. В эксперименте показано, что существует высокая корреляционная связь ($r = 0,97$) между концентрацией меланина в среде и подавлением роста клеток *Bacillus subtilis* B-1258. Полученные в работе данные свидетельствуют о перспективности исследований по использованию растительных меланинов в качестве противомикробных агентов в составе пищевых пленок для первичной упаковки продуктов питания.

Ключевые слова: лузга гречихи, меланин, противомикробная активность, *Penicillium roqueforti*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, *Lactobacillus plantarum*

Для цитирования: Уразова Я.В., Рожнов Е.Д., Школьников М.Н. Перспективы использования меланина в качестве антибактериального агента потребительской упаковки // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 2. С. 234–242. DOI: 10.21285/achb.980. EDN: GXVAXF.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Prospects of using melanin as an antimicrobial agent in food packaging

Yana V. Urazova*, Evgeny D. Rozhnov**✉, Marina N. Shkolnikova**

*Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation

**Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Melanin, known for its high physiological activity and functional properties, has attracted research interest as a potential antimicrobial agent in food systems and consumer packaging. This study investigated the antimicrobial activity of melanin derived from buckwheat hulls against the bacterial microbiota present in industrially produced

cheeses. The research objects were purified melanin obtained from buckwheat hulls and the following microbial strains: *Penicillium roqueforti*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, and *Lactobacillus plantarum*. The disc-diffusion method and the cultivation of test strains in the presence of melanin were employed. Statistical analysis was carried out using Statistica 10 software. The study confirmed the antimicrobial activity of melanin against Gram-positive bacteria *Bacillus subtilis* B-12587 and *Penicillium roqueforti* F-1311. At the highest tested concentration, the zone of lysis for *Bacillus subtilis* B-12587 was 26.4 ± 0.2 mm, which was 1.28 times larger than that of *Penicillium roqueforti* F-1311 cells, 1.43 times larger than that of *Bacillus pumilus* B-7308 cells, and 1.58 times larger than that of *Lactobacillus plantarum* B-3242 cells. A strong correlation ($r = 0.97$) was identified between melanin concentration in the medium and the growth inhibition of *Bacillus subtilis* B-12587. These findings highlight the potential of plant-derived melanins as antimicrobial agents in food-grade films intended for primary packaging.

Keywords: buckwheat hull, melanin, antimicrobial activity, *Penicillium roqueforti*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, *Lactobacillus plantarum*

For citation: Urazova Ya.V., Rozhnov E.D., Shkolnikova M.N. Prospects of using melanin as an antimicrobial agent in food packaging. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(2):234-242. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.980. EDN: GXVAXF.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время растет не только научный, но и практический интерес к природным пигментам, в частности меланинам – высокомолекулярным гидрофобным пигментам с высокой физиологической активностью и функциональными свойствами. Различают меланины растительного и животного происхождения, получаемые экстракцией сырья, в том числе с использованием ферментных препаратов, и микробного происхождения, получаемые химическим и микробиологическим синтезом (рис. 1). Меланины животного и растительного происхождения различны по молекулярному составу и физико-химическим свойствам [1].

Как видно из приведенных на рис. 1 данных, источники меланина весьма разнообразны по своей природе и видам. Некоторые из них, такие как чернила кальмара, сепии, семена арбуза, кунжута и османтуса и др., на наш взгляд, являются малопригодными для промышленного использования, хотя возможно их использование в технологии крафтовых продуктов питания.

Распространенным источником получения меланина служит чага березового гриба. Тем не менее возобнов-

ление данного сырья в природных условиях является длительным процессом. Поскольку природные ресурсы некоторых источников меланина, в частности чаги, ограничены, актуальны поиск высокопродуктивных микроорганизмов и разработка способов их культивирования с накоплением высоких концентраций целевого продукта – меланина. Таким образом, микробный синтез меланина с использованием различных микроорганизмов – как прокариотов, так и эукариотов – также имеет хорошие перспективы, доказанные современными исследованиями.

Наиболее перспективным для получения меланинов представляется использование вторичных сырьевых ресурсов, в том числе лузги подсолнечника, что обусловлено значительными объемами ежегодного образования этого сырья, низкой ценой на данный отход (от 0 до 2500 руб/т) и высокой антиоксидантной активностью выделенных меланинсодержащих составов [3]. В то же время получение меланинов из лузги подсолнечника характеризуется рядом недостатков, в частности высокими энергетическими затратами, что является экономически нецелесообразным для выде-

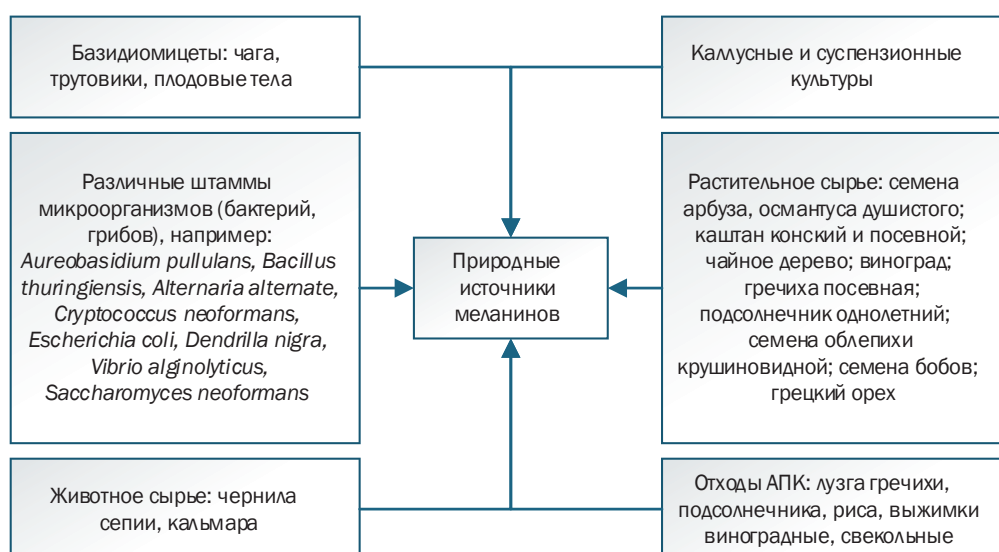


Рис. 1. Природные источники получения меланинов [2]

Fig. 1. Natural sources of melanin production [2]

ления целевого продукта, а также получением при этом жидкой формы продукта, что обуславливает трудности при хранении и транспортировке. Недостатком получения меланина из выжимок свеклы является низкий процент его выхода. Вышесказанное позволяет рассматривать в качестве перспективного источника меланина лузгу гречихи посевной.

Лузга гречихи является крупнотоннажным отходом, получаемым при производстве гречневой крупы. Согласно данным управления Алтайского края по пищевой и перерабатывающей промышленности, в 2023 г. объем собранной гречихи составил 929 тыс. т, а лузга гречихи составляет 20–25% от общей массы исходной гречихи (186–232 тыс. т)¹. Однако, несмотря на объемы произрастания гречихи, ее лузга до сих пор является невостребованным отходом, который не нашел практического применения. Стоит отметить, что клетки лузги гречихи имеют сложную волокнистую структуру, в которой меланиновый пигмент локализован в наружных слоях клеточных стенок. Еще одним достоинством лузги является низкая сырьевая стоимость, что позволяет включить способ получения меланина из лузги гречихи в ряд «наилучших доступных технологий». В соответствии со ст. 28.1 Федерального закона «Об охране окружающей среды»² «наилучшие доступные технологии» позволяют расширить экологическую и экономическую эффективность российского производства, таким образом, использование вторичных ресурсов растительного сырья является актуальной и востребованной задачей.

Меланины имеют высокую физиологическую активность и функциональные свойства, чем обусловлено их применение в растениеводстве, в технологии фармацевтических препаратов, пищевых систем, косметических средств. Так, в работе [4] для определения антимикробных свойств образцов меланина, полученных из отходов виноделия, использовались условно-патогенные бактерии, принадлежащие к различным таксономическим группам. Результаты показали, что раствор меланина проявлял бактериостатическую или бактерицидную активность в зависимости от тест-культуры и концентрации меланина. Меланин в концентрации 20 мг/мл снижал общее количество клеток *Bacillus subtilis* G17-89, *Salmonella typhimurium* G38 и *Escherichia coli* K12 примерно на 20%. Меланин в концентрации 40 мг/мл подавлял рост *Bacillus subtilis* G17-89 и *Candida glogengiesseri* 10228 почти на 100%. В случае *Escherichia coli* K12 меланин в концентрации 30 мг/мл оказывал тот же эффект, что и в концентрации 40 мг/мл, и снижение количества клеток происходило примерно на 50%. Самую низкую эффективность меланин показал против *Salmonella typhimurium* G38. Концентрация меланина 30 мг/мл уменьшала рост *Candida bovina* 10118 примерно на 80%. Также установлено, что низкие концентрации меланина обладали бактериостатической активностью в отношении грибов родов *Aspergillus fumigatus* 8444,

Aspergillus flavus 10559, *Cladosporium herbarium* 8270, *Cladosporium elatum* 8192, *Fusarium oxysporum* 12017, *Fusarium solani* 12018, *Mucor hiemalis* 12020, *Mucor plumbeus* 12021, *Penicillium chrysogenum* 8203, *Penicillium expansum* 8281.

Нельзя не отметить, что производство биопленок для упаковки пищевых продуктов, армированных наночастицами меланина, является сегментом рынка, представляющим большой интерес ввиду экологических и социальных проблем, связанных с утилизацией обычных пластиков по окончании срока службы, постепенным истощением ископаемых ресурсов, проблемами устойчивости и высокой производительностью [5].

Консервирующие и защитные свойства меланина от ультрафиолетовых лучей позволяют использовать его как компонент активной упаковки, предотвращающий фотодegradацию, сохраняющий качество упакованных пищевых продуктов и увеличивающий срок их хранения [6]. Ученые Ю.-Дж. Бэнг, С. Шанкар и Дж.-У. Райм в 2020 г. получили упаковочную пленку на основе композитных материалов полипропилена с добавлением меланина и исследовали возможность предотвращения «позеленения» картофеля под действием ультрафиолетового излучения – выработки соланина или картофельного яда, который способен вызывать пищевые отравления [7, 8]. Имеются сведения, что меланин обладает антибактериальными свойствами и может предотвращать развитие нежелательных микроорганизмов. Известны данные по исследованию антибактериальной активности меланина в отношении кишечной палочки и патогенных бактерий пищевого предназначения [9].

В работе [10] ученые создали биоактивную пленку на основе полимолочной кислоты с добавлением меланина, выделенного из *Agaricus bisporus*, и обнаружили, что пленка проявляет мощную антибактериальную активность против *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Pseudomonas putida* при упаковке пищевых продуктов.

Известны данные о проявляемой антибактериальной активности меланина, выделенного из чернил сепии, в отношении синегнойной палочки (*Pseudomonas* spp.) и грибов актиномицетов [11], а также высокой антибактериальной активности каррагинановых пленок с частицами меланина в отношении пищевых условно-патогенных и патогенных бактерий *Escherichia coli* и *Listeria monocytogenes*. Кроме того, значительно улучшены свойства пленок от ультрафиолетового излучения, увеличена термическая стабильность, механическая прочность и упругость пленок [12].

В работе [13] также показана возможность использования меланина, синтезированного выделенными из морской губки *Dendrilla nigra* морскими актинобактериями, в технологии первичной упаковки пищевых продуктов. Авторы подтвердили антибактериальные свойства против пищевых патогенов *Bacillus subtilis* (MTCC 1305), *Bacillus cereus* (MTCC 1307), *Staphylococcus*

¹ Управление Алтайского края по пищевой, перерабатывающей, фармацевтической промышленности и биотехнологиям // Upr.alregn.ru. Режим доступа: <https://upr.alregn.ru> (дата обращения: 12.02.2025).

² Об охране окружающей среды: федер. закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 8 августа 2024 г.) // Росприроднадзор. Режим доступа: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/960/f8krnogh6f3f7zifa4s7t0pneucflurz/Federalnyy-zakon-ot-10_01_2002-N-7_FZ_red_ot-08_08_2024_.pdf (дата обращения: 14.05.2025).

aureus (MTCC 2940), *Escherichia coli* (MTCC 739), *Vibrio cholerae* (MTCC 3906), *Vibrio parahaemolyticus* (MTCC 451), *Vibrio vulnificus* (MTCC 1145), *Pseudomonas aeruginosa* (MTCC 2458) и *Salmonella typhi* (MTCC 734), что открывают определенные перспективы применения меланина в промышленности и пищевой упаковке.

Таким образом, исследование эффективности меланина в подавлении роста микроорганизмов, вызывающих порчу пищевых продуктов, показало, что его можно использовать в качестве натурального консерванта в составе потребительской упаковки пищевых продуктов – пленки и покрытия – для предотвращения контаминации пищевых продуктов и продления сроков их хранения.

В то же время сведений о проявляемой антибактериальной активности меланина, выделенного из других растительных материалов и отходов агропромышленного комплекса, а также добавлении его как компонента в защитные пленки жиросодержащих/белоксодержащих продуктов не обнаружено. Данная область может быть актуальной для дальнейших исследований.

Молочнокислые продукты, в том числе и сыры, входят в ежедневный рацион большинства людей. Сыр имеет утонченный вкус, богат белками, витаминами, макро- и микроэлементами. В то же время он является продуктом с коротким сроком хранения и представляет собой комфортную среду для размножения бактерий. Микроорганизмы, вызывающие порчу сыра, также могут быть вызваны некачественным сырым молоком. Например, термодурические виды *Bacillus*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Microbacterium*, *Micrococcus* и *Streptococcus* способны после пастеризации размножаться в некоторых сырных продуктах, однако к естественной порче сыра относят различные виды плесневелых грибов [14].

В настоящее время с целью придания ровной формы сыра и предотвращения развития патогенной микрофлоры используют восковое покрытие. К достоинствам данного вида покрытия можно отнести легкость нанесения и выполнение своих защитных функций. Недостатками, в свою очередь, является то, что парафиновое покрытие применимо не для всех типов сыров, к тому же при нарушении технологии нанесения на продукте может развиваться плесень. Также при потреблении продукта в пищу парафиновая пленка частично срезается вместе с сыром, так как его поверхность, находящаяся в близком контакте с парафином, становится специфичной по вкусу, запаху и ей свойственно затвердевание. При срезании воскового покрытия сыр снова становится подвержен окислению жиров и порче, а упаковка его в пищевую пленку лишь позволяет избежать подсыхания и «заветривания» продукта, способствуя его микробиологической порче [15].

Стоит отметить, что известен опыт использования бактериального меланина из *Pseudomonas putida* в составе пленок из глицерина и сорбита и изучено их влияние на микробиологическую стойкость и цвет твердого сыра в течение 40 дней. Установлено, что после 40 дней созревания в образце сыра, покрытого пленкой с меланином, низин и натамицином, обнаружено наименьшее количество микроорганизмов по всем анализируемым микробным параметрам. Однако низин и натамицин, входящие в состав пленки, являются широко известными антибиотиками [16], обладающими самостоятельной бактериостатической и бактерицидной активностью, что не позволяет в полной мере оценить вклад меланина в снижение общей обсемененности образцов.

Целью описанного в данной работе исследования являлось изучение противомикробной активности меланина, выделенного из лузги гречихи, в отношении ряда микроорганизмов, идентифицируемых в составе бактериальной микрофлоры сыров промышленного производства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оценку противомикробной активности меланина в отношении исследуемых микроорганизмов проводили диско-диффузионным методом по МУК 4.2.1890-041 [17]. В качестве тест-культур были выбраны *Penicillium roqueforti*, *Bacillus subtilis* и *Bacillus pumilus*, которые являются типичными представителями посторонней микрофлоры сыров и сырных продуктов, а также *Lactobacillus plantarum*. Последняя является составной частью нормальной микрофлоры сыров, однако при возникновении видимой порчи продукта необходимо отследить подавление всех видов микроорганизмов. Свойства тест-культур, использованных в исследовании, приведены в табл. 1.

Чистые культуры исследуемых клеток выращивали на рекомендуемых средах. Перед посевом на плотную питательную среду культуру клеток в условиях стерильного бокса микробиологической петлей переносили на стандартизированную жидкую питательную среду – мясопептонный бульон – и осуществляли культивирование в рекомендуемых условиях с использованием сухового термостата ТС-1/80 СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия). Далее инокулом суспензионной культуры клеток в концентрации 0,5 по шкале Макфарланда³ вносили в чашки Петри на стандартизированную плотную питательную среду – мясопептонный агар – и равномерно распределяли с использованием шпателя Дригальского.

Очищенный меланин из лузги гречихи, полученный по способу, описанному в источнике [18], предварительно

Таблица 1. Свойства тест-культур, применяемых в исследовании

Table. 1. Properties of test cultures used in the study

Свойство	Тестовая культура микроорганизма			
	<i>Penicillium roqueforti</i> (штамм F-1311)	<i>Bacillus subtilis</i> (штамм В-12587)	<i>Bacillus pumilus</i> (штамм В-7308)	<i>Lactobacillus plantarum</i> (штамм В-3242)
Среда для культивирования	Мальт-пептонный агар	Среда Лурия	Мясопептонный агар	Среда MRS
Условия культивирования	27 °С, аэробно	37 °С, аэробно	37 °С, аэробно	27 °С, аэробно

³ Cockerill F.R., et al. Antimicrobial susceptibility testing methods for aerobically growing bacteria: approved standard. 2012. 12 p.

растворяли в 0,05 М растворе NaOH и диметилсульфоксиде для получения растворов с концентрацией растворенного меланина 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0%. Стерильные диски (диаметр 5 мм) смачивали подготовленными растворами (1 мкл) и размещали на поверхности питательной среды с заранее нанесенными культурами клеток на равном удалении друг от друга

После инокуляции подготовленные засеянные чашки подсушивали в ламинар-боксе в течение 30 мин при комнатной температуре, так как излишняя влага препятствует нормальному ходу эксперимента. Засеянные чашки Петри культивировали при температуре 27 ± 1 °C (для штаммов *Penicillium roqueforti* и *Lactobacillus plantarum*) и 37 ± 1 °C (для штаммов *Bacillus subtilis* и *Bacillus pumilus*) течение 24 ч до полного зарастания колоний и производили оценку зоны просветления.

Через сутки на газоне сплошного роста культуры отмечали образование зон подавления роста микроорганизмов в виде прозрачной зоны лизиса вокруг дисков и сравнивали чувствительность культуры микроорганизмов к исследуемым препаратам меланина.

Определение диаметра зон лизиса вокруг дисков осуществляли с использованием штангенциркуля с точностью до 0,5 мм. Все экспериментальные исследования проводили в пяти повторностях, результаты представляли как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение.

Для оценки влияния меланина на рост *Bacillus subtilis* В-12587 использовали метод острых опытов [19]. В качестве культуральной среды для роста *Bacillus subtilis* В-12587 использовали мясоептонный бульон. В асептических условиях в 50 мл стерильной среды вносили рассчитанное количество меланина и 11 мл клеток тест-штамма (концентрация клеток – $1 \dots 5 \times 10^5$ КОЕ/мл). Колбы культивировали в термостатируемом шейкере

BioSan ES-20 (BioSan, Латвия) при 37 °C и 60 об/мин. Контролем служила суспензия тест-штамма, культивируемая в тех же условиях, но без добавления меланина. Прирост биомассы оценивали по увеличению оптической плотности культуральных сред [20]. Оптическую плотность образцов определяли при 490 нм в кюветах с длиной оптического пути 10 мм на спектрофотометре Shimadzu UV1800 (Shimadzu, Япония). Расчет удельной скорости роста проводили традиционным графоаналитическим способом путем обработки экспериментальных данных.

Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием пакета Statistica 10. Для оценки изменений антимикробной активности использовали трехфакторный дисперсионный анализ (независимые переменные – растворитель, концентрация меланина, штамм тест-культуры), сравнение средних значений осуществляли с использованием теста Тьюки ($p < 0,05$); сила влияния оценивалась методом Снедекора ($p < 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мелкодисперсный черно-коричневый меланин был получен после предварительной обработки лузги кислотой аммиачной экстракцией из лузги гречихи с дальнейшим его осаждением при pH 2,0. Очистка меланина включала в себя двойное переосаждение меланина-сырца. Результаты измерений образовавшихся зон просветления микробиального газона вокруг дисков, смоченных растворами меланина, представлены в таблице 2.

Трехфакторный дисперсионный анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что основным фактором, влияющим на антимикробную активность меланина в изучаемых условиях, является концентрация меланина (сила влияния фактора – 64,5%), вторым по значимости

Таблица 2. Результаты определения зон лизиса в условиях контролируемого эксперимента

Table 2. Results of determination of lysis zones under controlled experimental conditions

Растворитель	Концентрация меланина, %	Диаметр зоны просветления (мм)			
		<i>Penicillium roqueforti</i> (штамм F-1311)	<i>Bacillus subtilis</i> (штамм В-12587)	<i>Bacillus pumilus</i> (штамм В-7308)	<i>Lactobacillus plantarum</i> (штамм В-3242)
–	Отрицательный контроль – вода	Отсутствуют зоны лизиса			
Серия А (0,05 н NaOH)	Положительный контроль – 0,05 н NaOH	Отсутствуют зоны лизиса			
	0,1 (образцы 1–4)	6,0 $\pm$ 0,2	8,7 $\pm$ 0,1	2,9 $\pm$ 0,1	3,8 $\pm$ 0,2
	0,5 (образцы 5–8)	11,4 $\pm$ 0,2 ³²	15,5 $\pm$ 0,2	6,7 $\pm$ 0,2 ²¹	8,1 $\pm$ 0,2 ²⁸
	1,0 (образцы 9–12)	14,9 $\pm$ 0,1 ¹⁵	18,5 $\pm$ 0,2 ^{19,40}	9,9 $\pm$ 0,1	10,4 $\pm$ 0,1 ²²
	1,5 (образцы 13–16)	17,4 $\pm$ 0,1 ²⁶	22,7 $\pm$ 0,2 ³⁷	14,7 $\pm$ 0,2 ⁹	12,6 $\pm$ 0,1
	2,0 (образцы 17–20)	20,5 $\pm$ 0,2	26,4 $\pm$ 0,2	18,4 $\pm$ 0,1 ^{20,40}	16,7 $\pm$ 0,2 ^{29,35}
Серия Б (диметилсульфоксид)	Положительный контроль – диметилсульфоксид	Отсутствуют зоны лизиса			
	0,1 (образцы 21–24)	7,0 $\pm$ 0,2 ⁷	10,5 $\pm$ 0,2 ^{12,31}	3,4 $\pm$ 0,1	4,7 $\pm$ 0,2
	0,5 (образцы 25–28)	13,2 $\pm$ 0,2	17,6 $\pm$ 0,1 ¹³	8,0 $\pm$ 0,2 ⁸	9,5 $\pm$ 0,1
	1,0 (образцы 29–32)	16,6 $\pm$ 0,1 ^{30,35}	19,8 $\pm$ 0,1 ³³⁻³⁹	10,8 $\pm$ 0,2 ²²	11,6 $\pm$ 0,2 ⁵
	1,5 (образцы 33–36)	19,6 $\pm$ 0,1 ^{30,39}	21,6 $\pm$ 0,2	16,4 $\pm$ 0,2 ^{20,29}	14,3 $\pm$ 0,2
	2,0 (образцы 37–40)	22,5 $\pm$ 0,1 ¹⁴	23,8 $\pm$ 0,2	19,8 $\pm$ 0,1 ³⁰⁻³³	18,3 $\pm$ 0,1 ^{10,19}

Примечание. Различия средних значений в столбце с разными надстрочными цифрами несут незначительны ($p < 0,05$). Надстрочные цифры соответствуют номерам образцов.

фактором являются видовые различия в восприимчивости тестовых культур к меланину как антимикробному агенту (сила влияния фактора – 31,5%). Природа растворителя влияет незначительно (сила влияния фактора не превышает 3,2%). Сила возможных совместных взаимодействий изучаемых факторов составляет от 0,1 до 0,4%, что можно считать незначительным воздействием на проявление антимикробной активности меланина.

Представленные в табл. 2 данные позволяют сделать выводы о том, что исследуемый меланин из лузги гречихи проявляет антимикробную активность в отношении всех исследуемых тест-культур. При использовании в качестве растворителя диметилсульфоксида наблюдается незначительное увеличение антимикробной активности во всех вариантах опыта. Можно предположить, что слабощелочные растворы меланина проявляют меньшую антимикробную активность за счет внутримолекулярного взаимодействия гидроксильных групп меланина с растворителем NaOH, что приводит к образованию промежуточных соединений, отличающихся от исходного меланина. Использование диметилсульфоксида в качестве растворителя меланина исключает возникновение подобных взаимодействий, вследствие чего можно наблюдать антимикробную активность именно меланина.

Экспериментальные данные позволяют говорить о большей эффективности использования меланина в качестве антимикробного агента в отношении грамположительных бактерий *Bacillus subtilis* B-12587 и рокфорового пеницилла *Penicillium roqueforti* F-1311. Наименьшая антимикробная эффективность меланина отмечена в отношении грамположительных бактерий *Bacillus pumilus* B-7308 и *Lactobacillus plantarum* B-3242.

На следующем этапе исследования изучали ингибирующее действие меланина на бактерии *Bacillus subtilis* B-12587 методом острых опытов. На рис. 2 представлена динамика оптической плотности суспензии *Bacillus subtilis* B-12587 при периодическом культивировании в течение 18 ч в зависимости от количества меланина в питательной среде. Увеличение концентрации меланина в составе питательной среды приводит к снижению удельной скорости роста клеток *Bacillus subtilis* B-12587 ($p < 0,01$) (рис. 3).

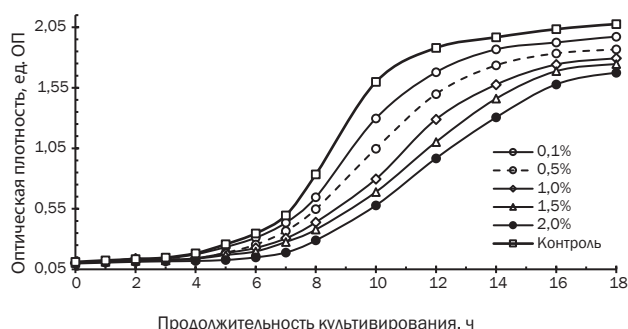


Рис. 2. Динамика оптической плотности суспензии *Bacillus subtilis* B-12587 при периодическом культивировании в зависимости от концентрации меланина

Fig. 2. Dynamics of optical density of *Bacillus subtilis* B-12587 suspension during periodic cultivation depending on melanin concentration

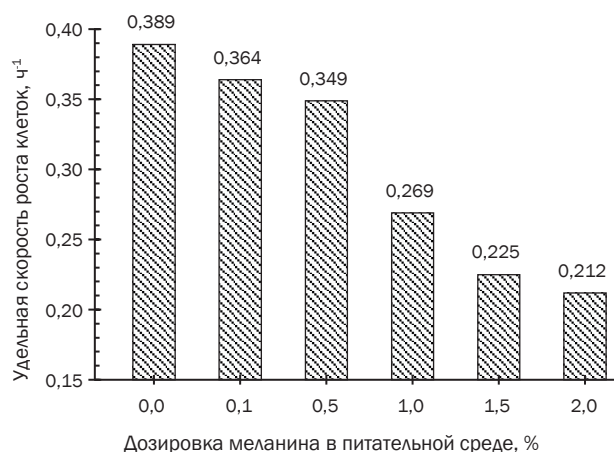


Рис. 3. Динамика удельной скорости роста клеток *Bacillus subtilis* B-12587 в зависимости от дозировки меланина в питательной среде

Fig. 3. Dynamics of the specific growth rate of *Bacillus subtilis* B-12587 cells depending on the dosage of melanin in the nutrient medium

В целом данные по антимикробной активности меланина, выделенного из крупнотоннажного отхода агропромышленного комплекса – лузги гречихи, демонстрируют эффективное подавление развития микрофлоры в присутствии меланина. Так, снижение удельной скорости роста клеток *Bacillus subtilis* B-12587 пропорционально увеличению концентрации меланина в среде (коэффициент корреляции $r = 0,97$).

Приведенные данные подтверждают факт того, что исследование использования растительных меланинов в качестве противомикробных агентов в составе пищевых пленок для первичной упаковки продуктов питания являются перспективными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлена антимикробная активность меланина из лузги гречихи в отношении грамположительных бактерий *Bacillus subtilis* B-12587 и рокфорового пеницилла *Penicillium roqueforti* F-1311. Установлено, что в максимальной исследуемой концентрации зона лизиса при культивировании клеток *Bacillus subtilis* B-12587 составляет $26,4 \pm 0,2$ мм ($p < 0,01$), что в 1,28 раза больше зоны лизиса клеток *Penicillium roqueforti* F-1311, в 1,43 раза больше зоны лизиса клеток *Bacillus pumilus* B-7308 и в 1,58 раза больше зоны лизиса клеток *Lactobacillus plantarum* B-3242. Показано, что при использовании в качестве растворителя диметилсульфоксида наблюдается незначительное увеличение антимикробной активности во всех вариантах опыта ($p < 0,01$). По нашему предположению слабощелочные растворы меланина проявляют меньшую антимикробную активность за счет внутримолекулярного взаимодействия гидроксильных групп меланина с растворителем NaOH, что приводит к образованию промежуточных соединений, использование диметилсульфоксида в качестве растворителя меланина исключает возникновение подобных взаимодействий, вследствие чего можно наблюдать антимикробную активность именно меланина.

В эксперименте показано, что существует высокая корреляционная связь ($r = 0,97$) между концентрацией меланина в среде и подавлением роста клеток *Bacillus subtilis* В-1258. Полученные в работе данные свиде-

тельствуют о перспективности исследований по использованию растительных меланинов в качестве противомикробных агентов в составе пищевых пленок для первичной упаковки продуктов питания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кадрицкая Е.А., Школьников М.Н. Применение меланина в пищевой промышленности // Аграрно-пищевые инновации. 2022. № 3. С. 69–76. DOI: 10.31208/2618-7353-2022-19-69-76. EDN: TKHXP.
2. Mostert A.B. Melanin, the what, the why and the how: An introductory review for materials scientists interested in flexible and versatile polymers // Polymers. 2021. Vol. 13, no. 10. P. 1670. DOI: 10.3390/polym13101670.
3. Lomovskiy I., Kiryanov A., Skripkina T. The effect of reverse sorption on an extraction kinetics melanin case // Processes. 2023. Vol. 11, no. 11. P. 3192. DOI: 10.3390/pr11113192.
4. Minasyan E., Aghajanyan A., Karapetyan K., Khachaturyan N., Hovhannisyan G., Yeghyan K., et al. Antimicrobial activity of melanin isolated from wine waste // Indian Journal of Microbiology. 2024. Vol. 64. P. 1528–1534. DOI: 10.1007/s12088-023-01155-9.
5. Tsouko E., Tolia E., Sarris D. Microbial melanin: renewable feedstock and emerging applications in food-related systems // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 7516. DOI: 10.3390/su15097516.
6. Yang M., Li L., Yu S., Liu J., Shi J. High performance of alginate/polyvinyl alcohol composite film based on natural original melanin nanoparticles used as food thermal insulating and UV-vis block // Carbohydrate Polymer. 2020. Vol. 233. P. 115884. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.115884.
7. Bang Y.-J., Shankar S., Rhim J.-W. Preparation of polypropylene/poly (butylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with melanin for prevention of greening of potatoes // Packaging Technology and Science. 2020. Vol. 33, no. 10. P. 433–441. DOI: 10.1002/pts.2525.
8. Łopusiewicz Ł., Drozłowska E., Trocer P., Kostek M., Śliwiński M., Henriques M.H.F., et al. Whey protein concentrate/isolate biofunctional films modified with melanin from watermelon (*Citrullus lanatus*) seeds // Materials. 2020. Vol. 13, no. 17. P. 3876. DOI: 10.3390/ma13173876.
9. Liang Y., Zhao Y., Sun H., Dan J., Kang Y., Zhang Q., et al. Natural melanin nanoparticle-based photothermal film for edible antibacterial food packaging // Food Chemistry. 2023. Vol. 401. P. 134117. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134117.
10. Łopusiewicz Ł., Jędra F., Mizielińska M. New poly(lactic acid) active packaging composite films incorporated with fungal melanin // Polymers. 2018. Vol. 10, no. 4. P. 386. DOI: 10.3390/polym10040386.
11. Roy S., Rhim J.-W. Preparation of carrageenan-based functional nanocomposite films incorporated with melanin nanoparticles // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2019. Vol. 176. P. 317–324. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2019.01.023.
12. Roy S., Shankar S., Rhim J.-W. Melanin-mediated synthesis of silver nanoparticle and its use for the preparation of carrageenan-based antibacterial films // Food Hydrocolloids. 2019. Vol. 88. P. 237–246. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.013.
13. Kiran G.S., Dhasayan A., Lipton A.N., Selvin J., Arasu M.V., Al-Dhabi N.A. Melanin-templated rapid synthesis of silver nanostructures // Journal of Nanobiotechnology. 2014. Vol. 12, no. 1. P. 18. DOI: 10.1186/1477-3155-12-18.
14. Galaby S.S., Maharik N.M.S., Khalifa M.I. Prevalence of some deteriorating microorganisms in raw milk and some locally made cheese // New Valley Veterinary Journal. 2021. Vol. 1, no. 2. P. 21–27. DOI: 10.21608/nvj.2021.205838.
15. Ibrahim R.A., El-Salam B.A.A., Alsulami T., Ali H.S., Hoppe K., Badr A.N. Neoteric biofilms applied to enhance the safety characteristics of Ras cheese during ripening // Foods. 2023. Vol. 12, no. 19. P. 3548. DOI: 10.3390/foods12193548.
16. Ferraz A.R., Goulão M., Santo C.E., Anjos O., Serralheiro M.L., Pintado C.M.B.S. Novel, edible melanin-protein-based bioactive films for cheeses: antimicrobial, mechanical and chemical characteristics // Foods. 2023. Vol. 12, no. 9. P. 1806. DOI: 10.3390/foods12091806.
17. Школьников М.Н., Аверьянова Е.В., Рожнов Е.Д., Баташов Е.С. Исследование антибактериальной активности флавоноидов облепихового шрота // Индустрия питания. 2020. Т. 5. N 3. С. 61–69. DOI: 10.29141/2500-1922-2020-5-3-7. EDN: AWZINX.
18. Пат. № 2780731, Российская Федерация, МПК C09B 61/00. Способ выделения меланина из лузги гречихи / Я.В. Уразова, Е.Д. Рожнов, Л.А. Баходина, Е.А. Кадрицкая, М.Б. Ребезов, М.А. Шарияти. Заявл. 02.06.2021; опубл. 29.09.2022. Бюл. № 28.
19. Zhang Z., Yang Y., Xi H., Yu Y., Song Y., Wu C., et al. Evaluation methods of inhibition to microorganisms in biotreatment processes: a review // Water Cycle. 2023. Vol. 4. P. 70–78. DOI: 10.1016/j.watcyc.2023.02.004.
20. Nielsen S.L., Hansen B.W. Evaluation of the robustness of optical density as a tool for estimation of biomass in microalgal cultivation: The effects of growth conditions and physiological state // Aquaculture Research. 2019. Vol. 50, no 9. P. 2698–2706. DOI: 10.1111/are.14227.

REFERENCES

1. Kadritskaya E.A., Shkolnikova M.N. The use of melanin in the food industry. *Agrarian-and-food innovations*. 2022;3:44-51. (In Russian). DOI: 10.31208/2618-7353-2022-19-69-76. EDN: TKHXP.
2. Mostert A.B. Melanin, the what, the why and the how: An introductory review for materials scientists interested in flexible and versatile polymers. *Polymers*. 2021;13(10):1670. DOI: 10.3390/polym13101670.
3. Lomovskiy I., Kiryanov A., Skripkina T. The effect of reverse sorption on an extraction kinetics melanin case. *Processes*. 2023;11(11):3192. DOI: 10.3390/pr11113192.
4. Minasyan E., Aghajanyan A., Karapetyan K., Khachaturyan N., Hovhannisyan G., Yeghyan K., et al. Antimicrobial activity of melanin isolated from wine waste. *Indian Journal of Microbiology*. 2024;64:1528-1534. DOI: 10.1007/s12088-023-01155-9.

5. Tsouko E., Tolia E., Sarris D. Microbial melanin: renewable feedstock and emerging applications in food-related systems. *Sustainability*. 2023;15(9):7516. DOI: 10.3390/su15097516.
6. Yang M., Li L., Yu S., Liu J., Shi J. High performance of alginate/polyvinyl alcohol composite film based on natural original melanin nanoparticles used as food thermal insulating and UV-vis block. *Carbohydrate Polymer*. 2020;233:115884. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.115884.
7. Bang Y.-J., Shankar S., Rhim J.-W. Preparation of polypropylene/poly (butylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with melanin for prevention of greening of potatoes. *Packaging Technology and Science*. 2020;33(10):433-441. DOI: 10.1002/pts.2525.
8. Łopusiewicz Ł., Drozłowska E., Trocer P., Kostek M., Śliwiński M., Henriques M.H.F., et al. Whey protein concentrate/isolate biofunctional films modified with melanin from watermelon (*Citrullus lanatus*) seeds. *Materials*. 2020;13(17):3876. DOI: 10.3390/ma13173876.
9. Liang Y., Zhao Y., Sun H., Dan J., Kang Y., Zhang Q., et al. Natural melanin nanoparticle-based photothermal film for edible antibacterial food packaging. *Food Chemistry*. 2023;401:134117. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134117.
10. Łopusiewicz Ł., Jędra F., Mizielińska M. New poly(lactic acid) active packaging composite films incorporated with fungal melanin. *Polymers*. 2018;10(4):386. DOI: 10.3390/polym10040386.
11. Roy S., Rhim J.-W. Preparation of carrageenan-based functional nanocomposite films incorporated with melanin nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019;176:317-324. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2019.01.023.
12. Roy S., Shankar S., Rhim J.-W. Melanin-mediated synthesis of silver nanoparticle and its use for the preparation of carrageenan-based antibacterial films. *Food Hydrocolloids*. 2019;88:237-246. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.013.
13. Kiran G.S., Dhasayan A., Lipton A.N., Selvin J., Arasu M.V., Al-Dhabi N.A. Melanin-templated rapid synthesis of silver nanostructures. *Journal of Nanobiotechnology*. 2014;12(1):18. DOI: 10.1186/1477-3155-12-18.
14. Galaby S.S., Maharik N.M.S., Khalifa M.I. Prevalence of some deteriorating microorganisms in raw milk and some locally made cheese. *New Valley Veterinary Journal*. 2021;1(2):21-27. DOI: 10.21608/nvj.2021.205838.
15. Ibrahim R.A., El-Salam B.A.A., Alsulami T., Ali H.S., Hoppe K., Badr A.N. Neoteric biofilms applied to enhance the safety characteristics of Ras cheese during ripening. *Foods*. 2023;12(19):3548. DOI: 10.3390/foods12193548.
16. Ferraz A.R., Goulão M., Santo C.E., Anjos O., Serralheiro M.L., Pintado C.M.B.S. Novel, edible melanin-protein-based bioactive films for cheeses: antimicrobial, mechanical and chemical characteristics. *Foods*. 2023;12(9):1806. DOI: 10.3390/foods12091806.
17. Shkolnikova M.N., Averyanova E.V., Rozhnov E.D., Batashov E.S. Antibacterial activity research of sea buckthorn meal flavonoids. *Food Industry*. 2020;5(3):61-69. (In Russian). DOI: 10.29141/2500-1922-2020-5-3-7. EDN: AWZINX.
18. Urazova Y.V., Rozhnov E.D., Bakholdina L.A., Kadritskaya E.A., Rebezov M.B., Shariati M.A. *Method for isolating melanin from buckwheat husks*. Patent RF, no. 2780731; 2022 (In Russian).
19. Zhang Z., Yang Y., Xi H., Yu Y., Song Y., Wu C., et al. Evaluation methods of inhibition to microorganisms in biotreatment processes: a review. *Water Cycle*. 2023;4:70-78. DOI: 10.1016/j.watcyc.2023.02.004.
20. Nielsen S.L., Hansen B.W. Evaluation of the robustness of optical density as a tool for estimation of biomass in microalgal cultivation: The effects of growth conditions and physiological state. *Aquaculture Research*. 2019;50(9):2698-2706. DOI: 10.1111/are.14227.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Уразова Яна Валерьевна,
старший преподаватель,
Бийский технологический институт (филиал)
Алтайского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Героя Советского Союза
Трофимова, 27, Российская Федерация,
urazova.iav@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6847-8487>

Рожнов Евгений Дмитриевич,
д.т.н., профессор,
Уральский государственный
экономический университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта /
Народной Воли, 62/45, Российская Федерация,
✉ red@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yana V. Urazova,
Senior Lecturer,
Biysk Technological Institute (branch)
of the Altai State Technical University,
27, Geroi Sovetskogo Soyuza Trofimov St.,
Biysk, 659305, Russian Federation,
urazova.iav@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6847-8487>

Evgeny D. Rozhnov,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Ural State University of Economics,
62/45, 8 Marta / Narodnoi Voli St.,
620144, Yekaterinburg, Russian Federation,
✉ red@bti.secna.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>

Школьников Марина Николаевна,
д.т.н., доцент, профессор,
Уральский государственный
экономический университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта /
Народной Воли, 62/45, Российская Федерация,
shkolnikova.m.n@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>

Marina N. Shkolnikova,
Dr. Sci. (Engineering),
Associate Professor, Professor,
Ural State University of Economics,
62/45, 8 Marta / Narodnoi Voli St.,
620144, Yekaterinburg, Russian Federation,
shkolnikova.m.n@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>

Вклад авторов

Я.В. Уразова – проведение исследования,
написание черновика рукописи.
Е.Д. Рожнов – разработка концепции,
формальный анализ, визуализация,
редактирование рукописи.
М.Н. Школьников – разработка методологии,
административное руководство
исследовательским проектом,
валидация результатов.

Yana V. Urazova – investigation,
writing – original draft.
Evgeny D. Rozhnov – conceptualization,
formal analysis, visualization, editing.
Marina N. Shkolnikova – methodology,
project administration, validation.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.12.2024.
Одобрена после рецензирования 11.02.2025.
Принята к публикации 31.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 04.12.2024.
Approved after reviewing 11.02.2025.
Accepted for publication 31.05.2025.