УДК 579.69 DOI: 10.7242/2658-705X/2026.3.5

ДРОЖЖИ В МИКРОБНЫХ КОНСОРЦИУМАХ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ БИОДЕГРАДАЦИЮ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКОПОЛЛЮТАНТОВ

Ефременко Е.Н., *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*
Степанов Н.А., *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

Среди микробных деструкторов органических экозагрязнителей особое место занимают дрожжи, способные формировать консорциумы с различными микроорганизмами. В работе проведен анализ наиболее часто встречающихся партнеров дрожжевых клеток в природных микробных консорциумах, а также указаны экополлютанты, деградация которых в загрязненных средах под действием полимикробных биосистем наиболее хорошо изучена. К числу таких экополлютантов относятся углеводороды нефти, микотоксины, фунгициды, красители, синтетические полимеры. В их биодеградации отмечена значимая роль разнообразных дрожжевых ферментных систем. Природный химический состав клеточных стенок дрожжей, а также их способность синтезировать и внутриклеточно накапливать определенные белки и пептиды обеспечивают дрожжи мощным сорбционным потенциалом по отношению к различным тяжелым металлам, отличающим их от других микроорганизмов. Максимальные степень и скорости биодеградации экозагрязнителей, которые присутствуют в водных средах, достигаются под действием консорциумов, содержащих высокие концентрации клеток дрожжей. Особое внимание уделено формированию кворумного ответа у дрожжей и его роли в регуляции свойств, проявляемых клетками в консорциумах. Отмечена возможность регуляции интенсивности развития биопленок и проявления кворума у клеток в консорциумах через регуляцию концентраций специфичных кворумных молекул. Обсуждаются возможности и перспективы конструирования искусственных консорциумов с участием дрожжей. Представленная информация дает понимание роли консорциумов дрожжей в высоко востребованных в современном мире процессах биодеградации органических экополлютантов.

Ключевые слова: *кворумный ответ, биокатализаторы, искусственные консорциумы, углеводороды нефти, микотоксины, фунгициды, красители, синтетические полимеры*

Введение

Сегодня несоблюдение существующих требований к обеспечению безопасного ведения сельского хозяйства и хранения различных отходов, нарушения технологических циклов в активно реализуемых промышленных процессах, а также техногенные аварии и террористические акты являются основными причинами появляющихся загрязнений почвенных и водных объектов окружающей среды различными экополлютантами. Сама природа при этом подсказывает наиболее действенные подходы к преодолению возникающих экологических проблем, выдвигая на передний план тех участников экосистем, которые способны осуществлять детоксификацию и эффективную очистку загрязненных сред от экополлютантов и их смесей. Как показывает анализ постоянно накапливающейся информации о результатах научных и практических исследований в разных странах мира, наиболее успешными участниками процессов, направленных на решение экологических проблем, оказываются консорциумы микроорганизмов [1-3]. Известно, что, в соответствии с принципом эмерджентности, живые объекты при формировании

©Авторы 2026 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

системных образований приобретают качественно новые характеристики, которые отсутствуют у отдельных компонентов этих биосистем, и новые свойства проявляются только в результате их взаимодействия и системной интеграции [4-6]. Устойчивость в проявлении новых свойств часто достигается за счет увеличения плотности клеточных популяций и проявления микроорганизмами «чувства кворума» (Quorum sensing), которое трактуется как «мудрость толпы» [7]. При этом проявление чувства кворума оказалось запрограммированным в геноме клеток разных микроорганизмов (бактерий, мицелиальных грибов, дрожжей, микроводорослей, архей), которые могут сосуществовать в качестве симбионтов в различных экосистемах [8-12].

Разнообразные формы сосуществования микроорганизмов, способных осуществлять разложение различных загрязнителей, в последнее время привлекают к себе всё больший интерес с научной и практической точек зрения, поскольку гетерогенный состав таких микробных сообществ позволяет сочетать в себе метаболические потенциалы участников и при тесном их взаимодействии приводить к улучшению известных и появлению новых свойств [13-16]. Следует отметить, что очень часто объектами исследования в таких сообществах становятся именно бактериальные клетки, обладающие самым широким спектром биохимических путей трансформации и биодеградации экополлютантов [17-20], но целью этого обзора стал анализ текущего состояния научных исследований микробных природных и искусственных консорциумов, в которые входят клетки дрожжей, способствующих снижению уровня загрязнения различных сред.

Разнообразие партнеров для дрожжей в составе микробных консорциумов и в процессах биодеградации экополлютантов, осуществляемых ими

Наиболее интересными свойствами обладают консорциумы, формирующиеся в естественных условиях окружающей среды и сочетающие в своем составе клетки дрожжей и бактерий, архей, мицелиальных грибов, а также микроводорослей, которые способны сосуществовать и катализировать процессы биодеградации и биоремедиации загрязненных участков почв и водных источников (Рис. 1).

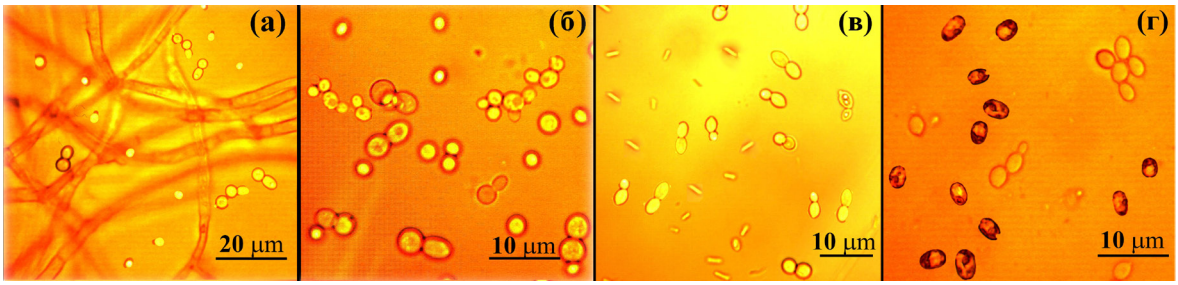


Рис. 1. Микрофотографии суспензионных консорциумов дрожжей S. cerevisia с мицелиальным грибом Aspergillus niger (а), с дрожжами Pachysolen tannophilus (б), с бактериями Komagataeibacter xylinus и с клетками микроводоросли Tetraselmis suecica (г)

Установлено, что такие природные консорциумы могут менять свой состав в зависимости от условий окружающей среды, что приводит к появлению новых взаимодействий внутри микробного сообщества и внешне проявляемых характеристик. Примером тому служат консорциумы, выделенные недавно из загрязненных нефтью участков почвы. Исследователями были идентифицированы в общей сложности

30 различных консорциумов, 16 из которых (дрожжи с грибами и бактериям), оказались наиболее эффективными в биодеградации углеводородов нефти [21]. Дрожжи родов *Candida* и *Yarrowia* оказались способны к деградации углеводородов нефти благодаря активности ключевых внутриклеточных ферментов (цитохрома P450, эпоксидгидролазы и глутатион-S-трансферазы), а также своей способности синтезировать биосурфактанты, повышающие биодоступность гидрофобных субстратов для клеток [22].

Показано, что консорциумы дрожжей и микроводорослей часто формируются при очистке сельскохозяйственных, бытовых и пищевых сточных вод [23]. При этом микроводоросли стимулируют метаболизм дрожжей за счет потребления углекислого газа, выделяемого ими, и фотосинтетического накопления в среде кислорода, который используется дрожжами для ассимиляции углеродных субстратов и накопления биомассы. Установлено, что дрожжи по сравнению с микроводорослями в таких консорциумах способны гораздо быстрее снижать концентрации органических загрязнителей в составе сточных вод. В числе партнеров для дрожжей (*Barnettomyza californica*, *Cyberlindnera subsufficiens*, *Candida thasaenensis*, *Candida gosingica*) в таких консорциумах чаще всего встречаются микроводоросли *Scenedesmus sp*. [24].

При изучении состава микробных консорциумов, формирующихся на очистных сооружениях, перерабатывающих биофармацевтические, целлюлозно-бумажные и муниципальные сточные воды, были выделены клетки дрожжей, принадлежащих к более 20 различным родам, которые присутствовали в составе аэробного ила в концентрациях, достигающих 10^5 клеток/г. В наибольших концентрациях в таких консорциумах присутствовали дрожжи – представители родов *Rhodotorula*, *Candida*, *Trichosporon* и *Pichia* [25]. Однако клетки дрожжей также могут присутствовать в составе метаногенных анаэробных илов вместе с бактериями, археями и некоторыми мицелиальными грибами [26]. Показано, что при очистке сточных вод с высоким содержанием солей могут формироваться микробные консорциумы, в которых при доминировании бактерий родов *Pseudomonas* и *Paracoccus* обязательными участниками могут быть галотолерантные дрожжи рода *Meyerozyma* [27]. Есть мнение, что консорциумы, состоящие только из клеток дрожжей родов *Saccharomyces*, *Candida*, *Barnettozyma*, *Wickerhamomyces*, *Debaryomyces*, *Hamamotoa*, *Meyerozyma*, *Sugiyamaellas*, *Thermomyces*, *Pichia*, *Scheffersomyces* и *Pachisolen*, имеют широкое распространение в природе, а наиболее хорошо изученными среди них являются те, что участвуют в процессах ферментации различных углеводсодержащих сред [28-31]. Исследования дрожжей, активно участвующих в конверсии различных сахаров в природных условиях, позволяют улучшить промышленные ферментационные процессы и прийти к пониманию механизмов, управляющих динамикой популяций в составе консорциумов и раскрывающих их суммарный генетический потенциал для создания новых видов продукции или использования субстратов, содержащих не глюкозу, а ксилозу, глицерин и др. [32-34]. Эти знания используются также для целенаправленного создания искусственных вариантов дрожжевых консорциумов, значительно улучшающих так называемые «этанольные» производственные процессы, использующие гидролизаты крахмало-, целлюлозо- и гемицеллюлозосодежащего сырья [28, 35, 36]. Из-за многокомпонентного состава таких сред участие в процессах их конверсии нескольких видов дрожжей оказывается целесообразным и более эффективным, чем действия одной дрожжевой культуры.

Анализ функционирования дрожжевых штаммов именно в составе консорциумов и изучение зависимости их способности продуцировать этанол в таких условиях остаются актуальными и сегодня [31].

Необходимо отметить, что в основе формирования микробных консорциумов с участием дрожжевых клеток лежат не только метаболические взаимодействия, но и непосредственные межклеточные контакты, реализуемые через механизмы биосорбции и адгезии [37]. Эти взаимодействия происходят благодаря наличию на поверхности клеток функциональных групп, которые включают карбоксильные, гидроксильные, амино- и фосфатные группы. Состав этих групп, как правило, оказывается типичным для определенного микроорганизма, но зависит от плотности популяции клеток дрожжей. Установлено, что в консорциумах дрожжи могут изменять свою морфологию, переходя к нитевидной форме клеток и синтезу белков – адгезинов, необходимых для их присоединения к различным поверхностям [38].

Для дрожжей, существующих в составе консорциумов, также установлено, что они способны эффективно выполнять роль биосорбентов экополлютантов, улучшающих их последующую метаболизацию или улучшающих условия безопасного существования партнеров дрожжей по консорциуму [39]. Этому способствует клеточная стенка дрожжей, содержащая повышенную в сравнении с бактериальными клетками суммарную концентрацию карбоксильных, амино- и фосфатных групп, которые могут принимать активное участие в биосорбции молекул загрязнителей [40].

Показано, что дрожжи способны эффективно адсорбировать широкий спектр загрязняющих веществ [39]. Наиболее часто они выступают в качестве экобиосорбентов для тяжелых металлов, присутствующих в загрязненных сточных водах. Их участие в подобных процессах предопределяется не только биохимическим составом поверхности клеток, но и быстрой скоростью накопления биомассы этих клеток в аэробных условиях [41, 42]. При этом среди тяжелых металлов, сорбируемых клетками дрожжей, находящихся в составе консорциумов, были выявлены медь, ртуть [43], свинец [44], хром, кадмий [45], уран [46].

Дрожжи при этом могут не только накапливать тяжелые металлы при их экспозиции в растворах с концентрацией до 300 мМ и сохранять жизнеспособность, но и использовать эти металлы для их включения во вновь синтезируемые дрожжами внутриклеточные металл-органические наночастицы. При этом тяжелые металлы образуют комплексы с внутриклеточными металлотионеинами и глутатионом, синтезируемыми дрожжами в повышенных концентрациях по сравнению с другими микроорганизмами. Такие формирующиеся металлопептидные комплексы, как показывают проведенные исследования, способны проявлять каталитические характеристики, эффективные в процессах фотокаталитического окисления различных экозагрязнителей [47].

Известно, что помимо тяжелых металлов дрожжи способны активно сорбировать микотоксины, синтезируемые мицелиальными грибами, поражающими сырье и продукцию пищевой промышленности [48].

Способствуя биоразложению и детоксикации микотоксинов, дрожжи не только участвуют в их биосорбции, но также используют свои внутриклеточные ферментные системы, в состав которых входят монооксигеназы, эпоксидгидролаза,

глутатион-S-трансфераза и другие ферменты, трансформирующие токсины мицелиальных грибов в безопасные продукты метаболической конверсии [49].

Установлено, что дрожжи, *Saccharomyces cerevisiae*, *Sugiyamaella novakii*, *Kluyveromyces marxianus*, *Pichia kudriavzevii*, *Schizosaccharomyces japonicus* могут играть ключевую роль в повышении безопасности и качества кормов для животных, связывая компонентами клеточной стенки (β-d-глюканами и маннопротеинами) различные микотоксины, продуцируемые мицелиальными грибами, поражающими сельскохозяйственную продукцию, и снижая их биодоступность [50, 51]. В частности, были продемонстрированы удаление из сельскохозяйственного сырья и нейтрализация цитотоксичности клетками дрожжей следующих микотоксинов: токсина Т-2, афлатоксина В1 [52; 53], фумонизина В1 [54], диоксиниваленола [55] и зеараленона [56].

Такие свойства дрожжевых клеток способствуют не только детоксикации самих сред, но и пролонгированному функционированию других микроорганизмов, в частности, бактерий, которые находятся с ними в совместных консорциумах [57]. Так, микотоксин патулин, содержащий в своей структуре лактонное кольцо, имитирующий лактон-содержащие молекулы кворумного ответа у бактерий и подавляющий его формирование у них, был нейтрализован дрожжами *Meyerozyma guilliermondii* на 93% в течение 2 суток [58].

Помимо микотоксинов, установлена возможность адсорбции и деградации ряда пестицидов отдельными штаммами дрожжей *S. cerevisiae*, а также дрожжами, не принадлежащими к роду *Saccharomyces* (*Metschnikowia pulcherrima*, *M. fructicola*, *M. chrysoperlae*, *M. zizyphicola*, *Starmerella bacillaris*, *Torulaspora delbrueckii*, *Lachancea thermotolerans*, *Pichia* sp.), участвующими в функционировании дрожжевых консорциумов в процессах спиртовой ферментации различного исходного сырья, выращенного с применением этих пестицидов [52, 59]. В частности, была установлена детоксикация клетками дрожжей таких фунгицидов, как пириметанил, ципродинил, процимидон, зоксамид и циазофамид [60, 61], инсектицида карбофурана и гербицида глифосата [62]. При этом наиболее активными в таких биодеградационных процессах оказались консорциумы, состоящие не только из штаммов *S. cerevisiae*, но и из дрожжей *Trichosporon cutaneum* и *Candida tropicalis*.

Еще одним важным типом экополютантов, в удалении которых активно участвуют дрожжевые консорциумы за счет своей способности к биосорбции и ферментативной биодеградации различных органических соединений, являются красители, появляющиеся в сточных водах [63]. Так, дрожжевые клетки *S. cerevisiae* были применены в качестве биосорбента для удаления красителя метилового оранжевого (50 мг/л) с эффективностью 96,5 % [64]. Дрожжи *Sterigmatomyces halophilus* были наиболее эффективными в биосорбции и деградации на 100% красителя реактивного черного (50 мг/л) в течение 24 ч. [65], тогда как дрожжи *Debaryomyces hansenii* обеспечивали 90% биодеградацию красителей реактивного синего и реактивного красного при их концентрации 100 мг/л в обрабатываемых средах [66]. Для дрожжей *Pichia occidentalis* была установлена максимальная биодеградационная активность по отношению к различным азокрасителям, в том числе красителю кислотному красному, разложение которого проходило через расщепление нафталин-амидиновой связи, восстановительное дезаминирование, окислительное дезаминирование, десульфуризацию, образование разомкнутого цикла гидроксизамещенного нафталина

с последующим включением образующихся продуктов в цикл трикарбоновых кислот. При этом было подтверждено увеличение активности таких внутриклеточных ферментов дрожжей, как Mn-пероксидазы и лакказы в 1,37 и 1,16 раза соответственно [67].

Объединение дрожжевых клеток, имеющих преференции в осуществлении биодеградации разных красителей, в консорциумы позволяет достигать максимального эффекта в очистке стоков с текстильных предприятий [68]. Так консорциум, состоящий из трех дрожжевых культур, демонстрировал возможность быстрого (в течение 6-12 ч) снижения концентрации красителей, содержащихся в реальных текстильных сточных водах в концентрации 100 мг/л, на 90-100% [69]. Консорциум, состоящий из двух дрожжевых культур (*Sterigmatomyces halophilus* и *Meyerozyma guilliermondii*), успешно справлялся со сложной смесью азокрасителей, в которой присутствовали реактивный черный, кислотно-оранжевый, реактивный зеленый, реактивный желтый и атлантический черный (все – в концентрации по 50 мг/л) [70]. В числе ключевых ферментов дрожжей, участвующих в формировании консорциумов и деградирующих различные красители, разными исследователями были выявлены одинаковые ферменты – оксидазы и редуктазы, в частности, фенолредуктаза, азоредуктаза, тирозиназа, Mn-пероксидаза и лакказа.

Было показано синергическое взаимодействие между клетками дрожжей *Rhodotorula sp*. в консорциуме с бактериями *Raoultella planticola* и *Staphylococcus xylosus* в процессе биодеградации метиленового синего [71]. Следует отметить, что в ряде указанных выше исследований с дрожжевыми консорциумами, которые использовались для деградации промышленных красителей, контролировались фито- и цитотоксичность образующихся продуктов и был подтверждён нетоксичный характер сред, получаемых после разложения этих экополлютантов.

Таким образом, сочетание способностей к биосорбции и ферментативной деградации различных экополлютантов, подтверждаемое в современных исследованиях, повышает актуальность использования дрожжей и их различных по составу консорциумов для создания высокоэффективных биокатализаторов, пригодных для детоксификации загрязнённых сред. Изучение механизмов межклеточного взаимодействия и изменений характеристик клеток дрожжей при определённых условиях их культивирования, выявленных в исследованиях природных консорциумов, является критически важным для использования в разработках искусственных консорциумов.

Кворумный ответ клеток дрожжей в регуляции свойств консорциумов

Для интенсификации различных биотехнологических процессов используются высококонцентрированные популяции клеток различных микроорганизмов [8]. Сегодня хорошо известно, что плотность клеток контролируется системами Quorum sensing (QS). QS представляет собой скоординированный, кооперативный ответ клеток, генерируемый глобальной системой регуляции экспрессии генов. При этом происходит формирование такого ответа клеток, который позволяет клеткам общаться и координировать своё «коллективное» поведение. Ответ запускается путем синтеза кворумных молекул, которые синтезируются клетками наряду с другими метаболитами. Когда концентрация клеток достигает порогового значения, клетки реагируют на эти сигналы и осуществляют обратную связь для регулирования своей морфологии.

Молекулы кворума в микробных клетках связаны с регуляцией производства вторичных метаболитов, симбиозом, патогенезом, образованием биопленок [9].

На сегодняшний день хорошо изучены молекулы QS у дрожжей, представляющие собой различные спирты: фарнезол, тирозол, 2-фенилэтанол, триптофол и другие [72]. Под их действием дрожжи могут претерпевать морфологические изменения, переходя к удлиненным формам, их агрегации, появлению псевдогиф и образованию биопленок (Рис. 2).

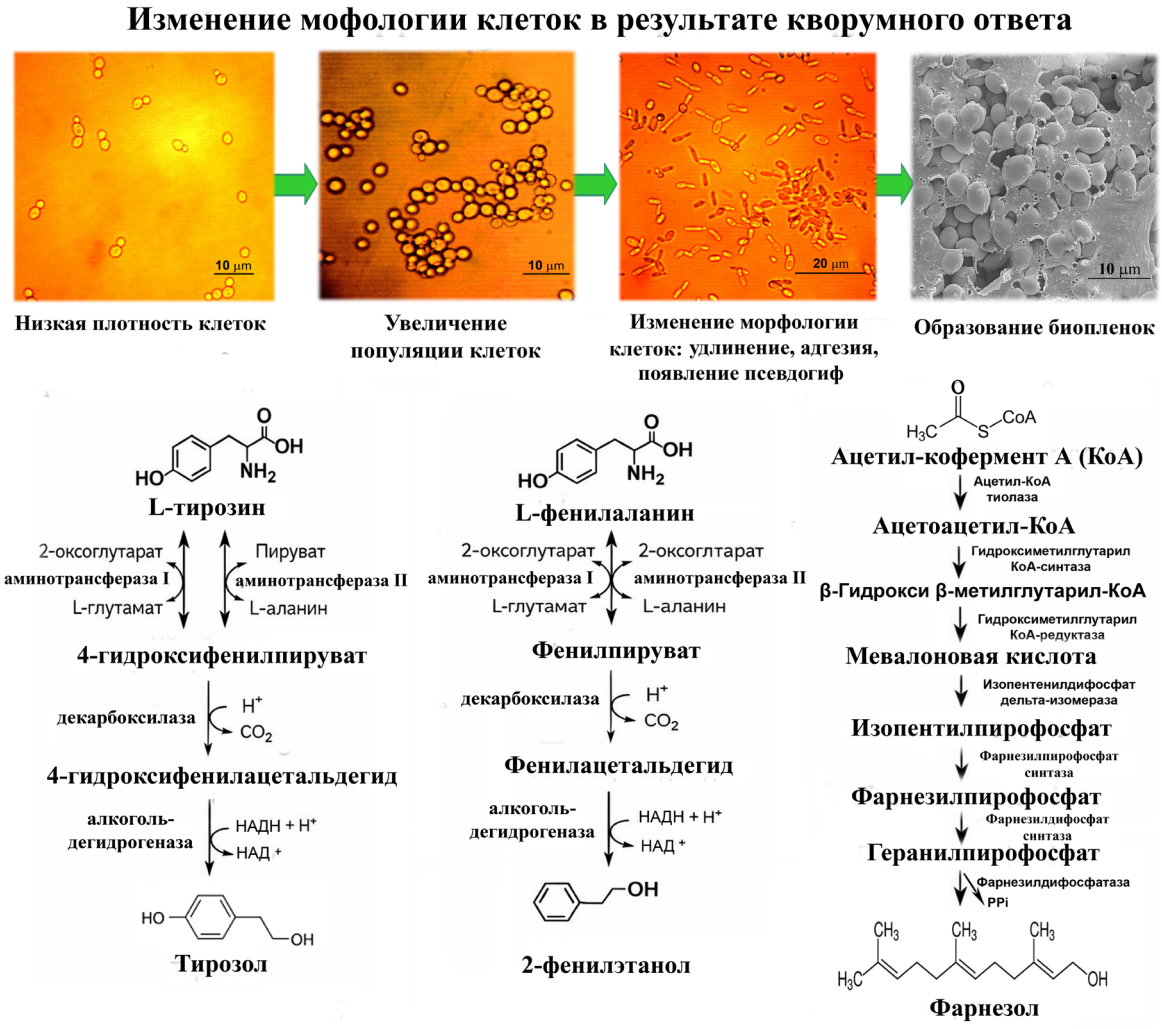


Рис. 2. Изменение морфологии клеток дрожжей под действием кворумных молекул и основные пути их биосинтеза

Наиболее хорошо изучены такие изменения у клеток дрожжей *Candida*. Фарнезол у этих видов дрожжей предотвращает изменение морфологии клеток из дрожжевой формы в мицелиальную, тогда как тирозол ускоряет развитие гиф и формирование биопленок [73].

Дрожжи рода *Saccharomyces* используют 2-фенилэтанол, триптофол и тирозол для контроля морфогенетических изменений в условиях азотного голодания [74]. Эти спирты регулируют морфологический переход дрожжей от классической клеточной формы к нитевидной. При этом 2-фенилэтанол и триптофол влияют на активацию генов, участвующих в клеточной адгезии и образовании биопленки [75]. Показано,

что максимальный уровень накопления 2-фенилэтанола достигается в стационарной фазе роста клеток, дефицит в среде именно источников азота повышает уровень синтеза этого спирта дрожжами.

Триптофол вызывает флокуляцию клеток дрожжей *S. cerevisiae*, которая является проявлением защитного механизма, обеспечивающего физическое экранирование внутренних слоев клеток от воздействия негативных факторов внешней среды [76].

Фарнезол синтезируется дрожжами в результате ферментативного дефосфорилирования фарнезилпирофосфата (Рис. 2), и его синтез не зависит от источника углерода или азота [77]. Помимо изменения морфологии клеток, фарнезол влияет на биохимические пути метаболизма дрожжей, связанные с биосинтезом стиролов как компонентов клеточных стенок, или регулирует запуск апоптоза за счёт накопления активных форм кислорода. Влияние фарнезола на клетки дрожжей зависит от его концентрации: при высоких концентрациях (200-300 мкМ) наблюдается ингибирование роста клеток дрожжей путем нарушения митохондриальной цепи переноса электронов, что сопровождается высвобождением активных форм кислорода, приводящим к апоптозу. Однако при снижении концентрации фарнезола до 40 мкМ происходит индукция синтеза каталазы и защита клеток от окислительного стресса и апоптоза [78].

Биосинтез тирозола как молекулы QS дрожжами происходит преимущественно за счет катаболизма тирозина (Рис. 2) и может быть повышен при введении в среду этой аминокислоты [77]. Потребность в таком управлении поведением дрожжевых клеток может возникать при их функционировании в консорциумах, используемых в различных биотехнологических процессах, в том числе при деградации различных экополлютантов, и способствовать увеличению общей производительности процессов. Было показано, что тирозол (50 мкМ) применим для целенаправленного повышения плотности популяции клеток дрожжей *Candida tropicalis* (до 48 раз) и увеличения их толерантности к разным металлам (2 мМ Zn^{+2}, 5 мМ Mn^{+2}, 2 мМ Co^{+2} и 1 мМ Cu^{+2}) вследствие того, что тирозол усиливает репликацию ДНК и синтез металл-связывающих пептидов и белков [79].

При очистке сточных вод было показано, что высококонцентрированные популяции клеток *Candida tropicalis* характеризуются лучшей флокуляцией и способностью к осаждению, что способствует их быстрому отделению от обрабатываемой ими среды. Этому посодействовал фенилэтанол, представляющий собой молекулу QS, меняющую морфологию и метаболизм дрожжей. Он был обнаружен в числе внеклеточных метаболитов в сточной среде, и его концентрация увеличивалась до 300 мг/л с повышением плотности клеток [10]. Таким образом, регулируя концентрацию клеток и молекул QS, можно повысить эффективность процесса очистки сточных вод, содержащих высокие концентрации загрязняющих веществ [80]. Экспериментально этот вывод был подтверждён исследованиями по использованию дрожжей для очистки сточных вод, загрязненных углеводородами нефти [81].

В ряде биотехнологических процессов с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* [74, 76], *Torulaspora delbrueckii* [82], *Wickerhamomyces anomalus*, *Candida glabrata*, *C. tropicalis* [83], *Torulaspora delbrueckii*, *Metschnikowia pulcherrima*, *Hanseniaspora uvarum* и *Starmerella bacillaris* [84] была подтверждена возможность повышения выхода этанола за счет внесения молекул QS (триптофола и 2-фенилэтанола) в концентрации 0,05-0,2 вес% в среды с клетками [85]. Особенно это было эффективно

при использовании в качестве субстратов различных пищевых отходов, для которых требовался предгидролиз. Оказалось, что добавление в ферментационные среды 25-50 мкМ тирозола и фенилэтанола значительно усиливает биосинтез гидролитических ферментов, расщепляющих присутствующие субстраты. Отмечено, что расширение за счет этого спектра биодоступных питательных веществ в средах с дрожжами в присутствии их кворумных молекул способствует формированию гетерогенных консорциумов дрожжей с бактериями родов *Limosilactobacillus*, *Weissella*, *Pediococcus*, *Clostridium* и *Bacillus* [86]. Установлено, что не только синтезу гидролаз способствует присутствие молекул кворума, но и белков адгезии (адгезинов) – гликопротеинов в составе клеточных стенок дрожжей, которые участвуют во взаимодействиях клеток дрожжей с разными поверхностями, друг с другом (флокуляция и филаментация) и другими клетками микроорганизмов.

На примере клеток *C. albicans* подтверждена способность дрожжей формировать смешанные микробные биопленки на различных тканях животных, медицинских имплантах, изделиях из различных материалов (металлов и пластиков) [87, 88]. В составе этих биопленок, а также биопленок, сформированных дрожжами *S. cerevisiae*, подтверждено присутствие фенилэтанола, синтез которого зависит от появления при исчерпании источника углерода циклического аденозинмонофосфата как трофического фактора [9]. Интересно отметить, что именно разные соотношения тирозола и фарнезола, накапливающиеся в среде с дрожжами по мере роста их численности, на разных стадиях формирования биопленок вызывают переход клеток от традиционных дрожжевых форм к гифам и наоборот. Стимуляция филаментации тирозолом может быть нивелирована присутствием фарнезола, который действует как ключевой сигнал на поздних стадиях развития биопленки и позволяет увеличить популяцию единичных клеток дрожжей. Например, концентрации фарнезола выше 100 мкМ блокируют морфологический переход у дрожжей к гифальной форме. Это явление особенно важно для борьбы со смешенными полимикробными биопленками, поскольку бактерии в таких биопленках преимущественно связываются через адгезины с гифальными филаментами дрожжей [89].

Следует отметить, что среди современных эффективных средств подавления роста и развития дрожжевых клеток, в том числе в составе полимикробных биопленок, наибольшее внимание к себе привлекают как раз те подходы, что основаны на использовании манипуляций с молекулами QS. Их введение в среды с дрожжами и их консорциумами в высоких концентрациях в сочетании с антимикробными агентами позволяет регулировать формирование биопленок, устойчивых к воздействию различных неблагоприятных факторов, и подавлять их дальнейшее метаболическое функционирование. Было изучено влияние самого фарнезола и его комбинаций с антибиотиками (оксациллином, цефокситином или канамицином) на смешанные биопленки, сформированные патогенами *Candida albicans* и *Staphylococcus aureus*. Минимальная ингибирующая концентрация фарнезола для смешанных биопленок дрожжей *C.albicans* и бактерий *S. aureus* составила 250 мкМ, а применение фарнезола в концентрации 300 мкМ в композиции с антибиотиком (2 мг/мл) обеспечивало гарантированное снижение жизнеспособности клеток в биопленках на 80% [89]. Также было установлено, что фарнезол, воздействуя на смешанные консорциумы с дрожжами, проявляет антибактериальную активность в отношении некоторых грамположительных клеток бактерий, повреждая целостность их цитоплазматической

мембраны [90]. Применение фарнезола одновременно с натамицином (0,6 ммоль/л) и натамицином (0,01 ммоль/л) показало свою эффективность против полимикробных биопленок, состоящих из дрожжей *Rhodotorula mucilaginosa*, *Candida tropicis*, *C. krusei* или *C. kefyr* и бактерий *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* или *Escherichia coli*, образующихся на ультрафильтрационных мембранах и поверхностях из нержавеющей стали на линиях по производству яблочного сока. Применение такой комбинации молекул QS с антимикробными агентами приводило к угнетению развития нитчатых форм дрожжей, расслоению матрикса биоплёнки и снижению численности клеток бактерий [91]. Комбинация фарнезола с карвакролом была эффективна против биопленок *C. albicans* и *Providencia stuartii*, *Staphylococcus aureus* [92].

Еще один подход к снижению стабильности популяций дрожжей и их консорциумов основан на применении ферментов, разрушающих кворумные молекулы дрожжей, при их сочетании с антимикробными агентами. В этом случае эффект подавляющего воздействия на дрожжи основан не на повышении, а на резком биокаталитическом снижении концентрации молекул QS в среде с клетками. Наиболее эффективными в этом случае оказались различные гидролазы [90, 93-95].

Таким образом, манипуляции с молекулами QS в биокаталитических системах на основе дрожжевых клеток делают возможным формирование биокатализаторов с улучшенными характеристиками, обеспечивающими эффективное проведение биотехнологических процессов и решение экологических задач за счет снижения уровня экополлютантов. А с другой стороны, возможно целенаправленное снижение негативных эффектов, связанных с образованием полимикробных биопленок, в том числе патогенных, с участием клеток дрожжей.

Искусственные консорциумы с участием дрожжей и их потенциал в решении экоориентированных задач

Целенаправленное конструирование искусственных микробных консорциумов сегодня является одним из активно развивающихся направлений так называемой «синтетической биологии», поскольку предполагает комбинирование разных микроорганизмов в такие биосистемы, в которых клетки способны переходить в устойчивые взаимодействия и эффективное сосуществование, обеспечивая максимальный эффект при их использовании в биотехнологических и экологически ориентированных процессах [96]. Искусственные консорциумы, включающие клетки микроорганизмов из разных царств, особенно привлекательны с научной и практической точки зрения, благодаря возможности расширения их суммарного метаболического потенциала [97-98].

Наиболее привлекательные характеристики искусственных консорциумов микроорганизмов, проявляющиеся при использовании кворумных биосистем, были установлены преимущественно при изучении бактериальных клеток [99], но полностью могут быть отнесены к дрожжесодержащим вариантам [8, 100]:

– простота в использовании, воспроизводимость композиций консорциумов;

– возможность введения максимальной целенаправленной метаболической активности в клетки консорциумов, которые могут быть улучшены за счет генетической модификации клеток;

– целенаправленное изменение соотношения концентраций клеток в консорциуме для регулирования скорости сопутствующих биохимических процессов, катализируемых клетками;

– устойчивое функционирование создаваемых консорциумов, которое сопровождается повышением степени конверсии исходных субстратов, в том числе токсичных соединений.

Растущий интерес к дрожжам как части искусственных консорциумов обусловлен тем, что они способны:

– участвовать в конверсии различных экозагрязнителей в аэробных и анаэробных условиях, в том числе в средах с низкими значениями pH [96, 101].

– использовать для деградации различных субстратов широкий спектр гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов [96].

Безусловно, для эффективного функционирования синтетических микробных консорциумов важно прогнозировать возможные типы взаимодействий всех микроорганизмов, входящих в искусственно создаваемые биосистемы. Чаще всего в основе этих взаимодействий лежит мутуализм или конкуренция [96, 99]. Мутуализм предполагает, что совместно культивируемые микроорганизмы оказывают благоприятное влияние друг на друга, при этом происходит стабилизация состава искусственных консорциумов, но только при определенной плотности клеток.

В случае конкуренции за субстрат участники консорциума могут выделять в среду метаболиты, негативно влияющие на других участников консорциума (органические кислоты, токсины, антимикробные пептиды, ферменты и др.). Как правило, эти процессы регулируются молекулами QS и условиями его формирования, которые могут использоваться для контроля или управления экспрессией определенных генов, контроля состава консорциумов и обеспечения межклеточных связей между определенными участниками консорциумов.

Иммобилизация клеток также может решить проблемы стабильности микробных консорциумов, поскольку в ограниченном пространстве клеточная коммуникация может быть более активной, что позитивно влияет на скорости биоремедиационных процессов. При этом включение клеток в гелевые матрицы имитирует состояние клеток в биопленках, к формированию которых стремятся участники искусственных консорциумов [96; 102, 103].

Консорциумы микроорганизмов применяются для выделения наиболее активных штаммов из различных природных источников, которые далее часто используются для составления новых консорциумов и разложения различных экополлютантов, в том числе трудно биодеградируемых [104]. Наиболее часто среди вводимых в искусственные консорциумы клеток дрожжей можно увидеть клетки *S. cerevisiae*, *Pichia pastoris*, *Yarrowia lipolytica* и *Candida parapsilosis* [105].

В ряде случаев в искусственные консорциумы включаются не только природные штаммы дрожжей, но и генетически модифицированные клетки. Это позволяет расширить спектр экополлютантов, которые могут быть подвергнуты деградации применяемыми консорциумами клеток. Так, в искусственный консорциум, сконструированный на основе дрожжей родов *Candida, Cryptococcus*, *Pichia*, *Rhodosporidium*, *Rhodotorula*, которые считаются потенциальными деструкторами алифатических и полиароматических углеводородов нефти (ПАУ) [22, 106], были введены дрожжи *Debaryomyces hansenii* с генетически улучшенной биодеградацией бенз[а]пирена [107, 108]. При этом в комбинации тех же дрожжей с бактериями *Pseudomonas putida* и *Bacillus persicus* в составе искусственного консорциума было продемонстрировано значительное повышение эффективности деградации пирена

(до 78%). Оказалось, что дрожжи выделяли в среду рамнолипид, который выполнял роль биосурфактанта и обеспечивал повышение биодоступности пирена [109]. Кроме того, было установлено, что именно при участии ферментов дрожжей (цитохрома P450, эпоксидгидролазы и глутатион-S-трансферазы) происходила успешная деградация ПАУ в загрязненных средах под действием искусственных консорциумов [110]. Было обнаружено, что дрожжи окисляют ПАУ посредством метаболизма или ко-метаболизма. Кроме того, было установлено, что некоторые изоляты дрожжей обладают более чем одним способом разложения ПАУ.

В ряде случаев при использовании именно искусственных консорциумов, содержащих в своем составе клетки дрожжей, были достигнуты более высокие результаты по деградации ряда экополлютантов в сравнении с отдельными дрожжевыми культурами или природными консорциумами. В частности, это относится к биодеструкции синтетических полимеров. Известно, что дрожжи, принадлежащие к родам *Vanrija*, *Rhodotorula*, *Meyerozyma*, *Candida*, способны осуществлять биодеградацию полиэтилентерефталата (на 10%) и полиэтилена (на 14%) [111], однако более эффективной деградации этих синтетических полимеров можно добиться под действием специально составленных синтетических микробных консорциумов. Например, для деградации полиэтилена был собран консорциум из трех штаммов дрожжей: *Sterigmatomyces halophilus*, *Meyerozyma guilliermondii* и *M. caribbica* [70]. Он обеспечивал снижение прочности полимера на 63.4% и потерю массы полимером на 33.2% в течение 45 суток. Дрожжи были способны к синтезу ферментов (Mn-пероксидазы и лакказы), активность которых возрастала именно в таком искусственном консорциуме [112]. Развитие процесса биодеструкции сопровождалось активным накоплением биомассы дрожжевых клеток-деструкторов и продуктов метаболизма полимера, среди которых были идентифицированы алканы, алкены, карбоновые кислоты, альдегиды, эфиры и спирты.

Достичь 22%-ной деградации полиэтилена в течение 56 суток удалось с использованием другого искусственного консорциума, в который были введены дрожжи *Candida parapsilosis*, бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и грибы родов *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Alternaria*, *Penicillium* и *Trichoderma*.

Заключение

Анализ основных направлений развития исследований консорциумов микроорганизмов, в состав которых входят дрожжи, показывает, что прогноз современных исследователей [113] связывает их в ближайшие годы с разработкой новых синтетических вариантов полимикробных биосистем, которые позволят не только осуществлять биодеградацию органических экополлютантов, но и совмещать этот процесс с получением новых ценных продуктов: металлосодержащих катализаторов [47], биотоплива [101], различных биологически активных веществ [97]. При этом учёт необходимости использования в составе консорциумов высоко концентрированных популяций клеток, обеспечивающих стабильность функционирования таких биосистем, как ожидается, будет стоять на переднем плане этих разработок. Перспективным представляется использование искусственно иммобилизованных форм консорциумов, включающих дрожжевые клетки, или использование характерной для дрожжей природной способности к автоагрегации клеток [114], которая позволяет легко и быстро отделять формируемые ими хлопьевидные агрегаты после очистки сточных вод от экополлютантов для многократного применения таких биосистем.

Библиографический список

1. *Krishna Raj C., Siranjeevi R., Susmitha, R., Sameera Shabnum S., Saravanan A., Vickram A.S., Chopra H.* Bioremediation in action: Recent progress, challenges, and future directions for environmental restoration // Biodegradation. 2026. – Vol. 37. – Article 9. DOI: 10.1007/s10532-025-10232-3.
2. *Omar A.N., Chirnside A.E.M., Kniel K.E.* Exploring novel fungal bioremediation treatments to inhibit pollutants and microbial hazards associated with untreated biological soil amendments of animal origin // Microorganisms. – 2025. – Vol. 13. – Article 2847. DOI: 10.3390/microorganisms13122847.
3. *Efremenko E.* Editorial for special issue “Biotechnology for environmental remediation” // Microorganisms. – 2026. – Vol.14. – Article 283. DOI: 10.3390/microorganisms14020283.
4. *Qattan S.Y.A.* Harnessing bacterial consortia for effective bioremediation: targeted removal of heavy metals, hydrocarbons, and persistent pollutants // Environmental Sciences Europe. – 2025. – Vol. 37. – Article 85. DOI: 10.1186/s12302-025-01103-y.
5. *Senko O., Stepanov N., Maslova O., Gladchenko M., Gaydamaka S., Aslanli A., Efremenko E.* Artificially obtained humic-like substances from chicken manure and symbionts in in vitro and in situ improvement of oil degradation in soil // Arabian Journal of Geosciences. – 2024. – Vol. 17. – Article 300. DOI: 10.1007/s12517-024-12105-0.
6. *Salini A., Zuliani L., Gonnelli P.M., Orlando M., Odoardo A., Ragno D., Aulitto M., Zaccone C., Fusco S.* Plastic-degrading microbial consortia from a wastewater treatment plant // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25. – Article 12747. DOI: 10.3390/ijms252312747.
7. *Moreno-Gámez S., Hochberg M.E., van Doorn G.S.* Quorum sensing as a mechanism to harness the wisdom of the crowds // Nature Communications. – 2023. – Vol. 14. – Article 3415. DOI: 10.1038/s41467-023-37950-7.
8. *Efremenko E., Senko O., Stepanov N., Aslanli A., Maslova O., Lyagin I*. Quorum sensing as a trigger that improves characteristics of microbial biocatalysts // Microorganisms. – 2023. – Vol. 11. – Article 1395. DOI: 10.3390/microorganisms11061395.
9. *Tian X., Ding H., Ke W., Wang L.* Quorum sensing in fungal species // Annual Review of Microbiology. – 2021. – Vol. 75. – P. 449–469. DOI: 10.1146/annurev-micro-060321-045510.
10. *Sun J., Sun H., Lv W., Zhang Q., Wan P., Jiang L., Zhong Y*. Quorum sensing mediates yeast cell morphology to improve settleability: Implication for wastewater treatment // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9. – Article 105817. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105817.
11. *Pawlikowska-Warych M., Tokarz-Deptuła B., Czupryńska P., Deptuła W*. Biofilm and quorum sensing in archaea // Acta Biologica. –2019. – Vol. 26. – P.35–44. DOI: 10.18276/AB.2019.26-04.
12. *Zhou Y., Tang L., Chen D., Li Y., Wu S., Qiao J.* Analysis and engineering of quorum sensing-based communications between bacteria and fungi // mBio. – 2026. – Vol. 17. – Article e0383825. DOI: 10.1128/mbio.03838-25.
13. *Maslova O., Senko O., Gladchenko M.A., Gaydamaka S.N., Efremenko E*. Prospects for combined applications of nanostructured catalysts and biocatalysts for elimination of hydrocarbon pollutants // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Article 5815. DOI: 10.3390/app13095815.
14. *Al-Mur B.A., Pugazhendi A., Jamal M.T.* Application of integrated extremophilic (halo-alkalo-thermophilic) bacterial consortium in the degradation of petroleum hydrocarbons and treatment of petroleum refinery wastewater under extreme condition // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 413. – Artile 125351. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125351.
15. *Efremenko E., Senko O., Teplova K., Aslanli A.* Biomass of microalgae and other phototrophic microorganisms: Current trends in regulation of its accumulation and application of immobilized forms // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – Article 12775. DOI: 10.3390/app152312775.
16. *Wang J., Chen X., Sun H., Li X., Lu Q., Qin P., Yang Y., Lai D., Luo L., Peng X., Yang Y., Wu Z.* Accelerated removal and mechanism of tetracycline from water using immobilized bacteria combined with microalgae // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13. – Article 115424. DOI: 10.1016/j.jece.2025.115424.
17. *Krivoruchko A.V., Kuyukina M.S, Ivshina I.B.* Advanced Rhodococcus biocatalysts for environmental biotechnologies // Catalysts. − 2019. − Vol. 9. − Article 236. DOI: 10.3390/catal9030236.

18. *Senko O., Maslova O., Aslanli A., Efremenko E.* Impact of perfluorocarbons with gas transport function on growth of phototrophic microorganisms in a free and immobilized state and in consortia with bacteria // Applied Sciences. − 2023. − Vol. 13. − Article 1868. DOI: 10.3390/app13031868.
19. *Efremenko, E., Senko O., Maslova O., Lyagin I., Aslanli A., Stepanov N*. Destruction of мycotoxins in poultry waste under anaerobic conditions within methanogenesis catalyzed by artificial microbial consortia // Toxins. − 2023. Vol. 15. − Article 205. DOI: 10.3390/toxins15030205.
20. *Филимонов И.В., Янковская А.А., Кужелко С.В., Завьялов В.В., Завьялова Н.В., Голипад А.Н., Колесников Д.П., Ковтун В.А., Холстов В.И., Лягин И.В., Ефременко Е.Н*. Исследования в сфере перспективного использования химико-биологических и медицинских биокаталитических технологий в интересах Вооруженных Сил // Вестник войск РХБ защиты. − 2018. − Т. 2. − № 2. − С. 18-50. DOI: 10.35825/2587-5728-2018-2-2-18-50.
21. *Ramdass A.C., Rampersad S.N.* Naturally-occurring microbial consortia for the potential bioremediation of hydrocarbon-polluted sites in Trinidad // Bioremediation Journal. – 2023. – Vol. 27. – P. 443-452. DOI: 10.1080/10889868.2022.2043235.
22. *Padilla-Garfias F., Araiza-Villanueva M., Calahorra M., Sánchez N.S., Peña A.* Advances in the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by yeasts: A Review // Microorganisms. – 2024. – Vol. 12. Article 2484. DOI: 10.3390/microorganisms12122484.
23. *Gururani P., Bhatnagar P., Kumar V., Vlaskin M.S., Grigorenko A.V.* Algal consortiums: A novel and integrated approach for wastewater treatment // Water. – 2022. – Vol 14. – Article 3784. DOI: 10.3390/w14223784.
24. *Walls L.E., Velasquez-Orta S.B., Romero-Frasca E., Leary P., Noguez I.Y., Ledesma M.T.O*. Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production. // Biochemical Engineering Journal. – 2019. – Vol. 151. – Article 107319. DOI: 10.1016/j.bej.2019.107319.
25. *Yang Q., Angly F.E., Wang Z., Zhang H*. Wastewater treatment systems harbor specific and diverse yeast communities // Biochemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 58. – P. 168–176. DOI: 10.1016/j.bej.2011.09.012.
26. *Efremenko E., Stepanov N., Senko O. Maslova O, Volikov A., Zhirkova A., Perminova I.* Strategies for variable regulation of methanogenesis efficiency and velocity // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2022. – Vol. 106. – P. 6833–6845. DOI: 10.1007/s00253-022-12148-x.
27. *Wen H., Xiong K., Yang H., Zhang P., Wang X*. Dynamic mechanism of the microbiota of high-salinity organic wastewater with salt-tolerant yeast and its application. // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Article 107377. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107377.
28. *Malik K., Salama E.S., El-Dalatony M.M., Jalalah M., Harraz F.A., Al-Assiri M.S., Li X*. Co-fermentation of immobilized yeasts boosted bioethanol production from pretreated cotton stalk lignocellulosic biomass: Long-term investigation // Industrial Crops and Products. – 2021. – Vol. 159. – Article 113122. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.113122.
29. *Belda I, Benitez-Dominguez B, Izquierdo-Gea S, Vila JCC, Ruiz J.* Ecology and evolutionary biology as frameworks to study wine fermentations // Microbial Biotechnology. – 2025. – Vol. 18. – Article e70078. DOI: 10.1111/1751-7915.70078.
30. *Benito Á., Calderón F., Benito S*. The influence of non-Saccharomyces species on wine fermentation quality parameters // Fermentation. 2019. – Vol. 5. – Article 54. DOI: 10.3390/fermentation5030054.
31. *da Silva E.G., Borges A.S., Maione N.R., Castiglioni G.L., Suarez C.A., Montano I.D*. Fermentation of hemicellulose liquor from Brewer's spent grain using Scheffersomyces stipitis and Pachysolen tannophilus for production of 2G ethanol and xylitol // Biofuels, Bioproducts and Biorefining – 2020. – Vol. 14. – P. 127–137. DOI: 10.1002/bbb.2072.
32. *Ali S.S., Wu J., Xie R., Zhou F., Sun J., Huang M*. Screening and characterizing of xylanolytic and xylose-fermenting yeasts isolated from the wood-feeding termite, Reticulitermes chinensis // PLoS ONE – 2017. – Vol. 12. – Article e0181141. DOI: 10.1371/journal.pone.0181141.
33. *Ruchala J., Sibirny A.A.* Pentose metabolism and conversion to biofuels and high-value chemicals in yeasts // FEMS Microbiology Reviews. – 2022. – Vol. 45. – Article fuaa069. DOI: 10.1093/femsre/fuaa069.

34. *Stepanov N., Efremenko E*. Immobilized cells of Pachysolen tannophilus yeast for ethanol production from crude glycerol // New biotechnology – 2017. – Vol. 34. – P. 54–58. DOI: 10.1016/j.nbt.2016.05.002.

35. *Chen L., Du J.-L., Zhan Y.-J., Li J.-A., Zuo R.-R., Tian S*. Consolidated bioprocessing for cellulosic ethanol conversion by cellulase–xylanase cell-surfaced yeast consortium // Preparative Biochemistry & Biotechnology. – 2018. – Vol. 48. — P. 653–661. DOI: 10.1080/10826068.2018.1487846;

36. *da Silva Fernandes F., de Souza É.S, Carneiro L.M, Alves Silva J.P., de Souza J.V.B., da Silva Batista J.* Current ethanol production requirements for the yeast Saccharomyces cerevisiae // International Journal of Microbiology. – 2022. – Vol. 2022. – Article 7878830. DOI: 10.1155/2022/7878830.

37. *Kulshrestha A., Gupta P.* Polymicrobial interaction in biofilm: mechanistic insights. // Pathogens and Disease. – 2022. – Vol. 80. – Article ftac010. DOI: 10.1093/femspd/ftac010.

38. *Ponde N.O., Lortal L., Ramage G., Naglik J.R., Richardson J.P*. Candida albicans biofilms and polymicrobial interactions // Critical Reviews in Microbiology. – 2021. – Vol. 47. – P. 91–111. DOI: 10.1080/1040841X.2020.1843400.

39. *Aeini K., Zoghi A., Khosravi-Darani K.* Application of yeasts as pollutant adsorbents // Current Microbiology. – 2025. – Vol. 82. – Article 368. DOI: 10.1007/s00284-025-04343-6.

40. *Mohiuddin O.P., Harvey A., Orta Ledesma M.T., Velasquez-Orta S*. Bioremediation of waste by yeast strains // Electronic Journal of Biotechnology. – 2024. – Vol. 69. – P. 30–42. DOI: 10.1016/J.EJBT.2024.01.005.

41. *Rahman Z., Singh V.P.* Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27. – P. 27563–27581. DOI: 10.1007/s11356-020-08903-0.

42. *Xie S.* Biosorption of heavy metal ions from contaminated wastewater: an eco-friendly approach // Green Chemistry Letters and Reviews. – 2024. – Vol. 17. – Article 2357213. DOI: 10.1080/17518253.2024.2357213.

43. *Aibeche C., Selami N., Zitouni-Haouar F.E.H., Oeunzar K., Addou A., Kaid-Harche M., Djabeur A.* Bioremediation potential and lead removal capacity of heavy metal-tolerant yeasts isolated from Dayet Oum Ghellaz Lake water (northwest of Algeria) // International Microbiology. – 2020. – Vol. 25. – P. 61–73. DOI: 10.1007/s10123-021-00191-z.

44. *Gupta N., Arunachalam S.* From consortium design to bioaugmented filters: scalable yeast-based strategies for lead remediation in water systems // Front Microbiology. – 2025. – Vol. 16. – Article 1647398. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1647398.

45. *De Rossi A., Rigueto C.V.T., Dettmer A., Colla L.M., Piccin J.S.* Synthesis, characterization, and application of Saccharomyces cerevisiae/alginate composites beads for adsorption of heavy metals // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 8. – Article 104009. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104009.

46. *Chen C., Hu J., Wang J*. Uranium biosorption by immobilized active yeast cells entrapped in calcium-alginate-PVA-GO-crosslinked gel beads // Radiochimica Acta. – 2020. – Vol. 108. – P. 273–286. DOI: 10.1515/RACT-2019-3150.

47. *Lyagin I., Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Senko O., Maslova O., Efremenko E.* Metal nanomaterials and hydrolytic enzyme-based formulations for improved antifungal activity // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24. – Article 11359. DOI: 10.3390/ijms241411359.

48. *Papp L.A., Horváth E., Peles F., Pócsi I., Miklós I.* Insight into yeast–mycotoxin relations // Agriculture. – 2021. – Vol. 11. – Article 1291. DOI: 10.3390/agriculture11121291.

49. *Lyagin I., Efremenko E.* Enzymes for detoxification of various mycotoxins: Origins and mechanisms of catalytic action // Molecules. – 2019. – Vol. 24.– Article 2362. DOI: 10.3390/molecules24132362.

50. *Alasmar R., Ul-Hassan Z., Zeidan R., Al-Thani R., Al-Shamary N., Alnaimi H., Migheli Q., Jaoua S.* Isolation of a novel *Kluyveromyces marxianus* strain QKM-4 and evidence of its volatilome production and binding potentialities in the biocontrol of toxigenic fungi and their mycotoxins // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5. – P. 17637–17645. DOI: 10.1021/acsomega.0c02124.

51. *Papp L.A., Adácsi C., Acs-Szabo L., Batta G., Csoma H., Pusztahelyi T., Pócsi I., Miklós I.* Co-cultivation of Schizosaccharomyces japonicus and Fusarium graminearum reveals the biocontrol effect of yeast and its potential genes for detoxification // Agriculture. – 2026. – V. 16 – Article 494. DOI: 10.3390/agriculture16050494.
52. *Ruchała J., Vasylyshyn R., Wnuk, M.* Yeast-based biotechnology for civilian security // Environmental Microbiology Reports. – 2026. – Vol. 18. – Article e70280. DOI:10.1111/1758-2229.70280.
53. *Alimi J.O., Bamishaye E.I., Alimi J.P.* Yeasts as biological detoxifiers of mycotoxins in agricultural produce. A Review // Food and Environment Safety Journal. – 2025. – Vol. 24. – P. 21-32. DOI: 10.4316/fens.2025.003.
54. *Papp L.A., Acs-Szabo L., Kovacs S., Adacsi C., Batta G., Pusztahelyi T., Pocsi I., Miklos I.* Transcriptome changes of fission yeast cells exposed to fumonisin B1 or co-cultured with Fusarium verticillioides // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2025. – Vol. 109. – Article 211. DOI: 10.1007/s00253-025-13601-3.
55. *Xiao J., Tan J., Guo R., Dai J., Xiu Z., Sun Y., Liu H., Li Y., Tong Y., Quan C.* Deoxynivalenol detoxification by a novel strain of Pichia kudriavzevii via enzymatic degradation and cell wall adsorption // Appl. Biochem. Biotechnol. – 2024. – Vol. 196. – P. 3102–3114. DOI: 10.1007/s12010-023-04712-6.
56. *Acs-Szabo L., Pfliegler W.P., Kovacs S., Adacsi C., Racz H.V., Horvath E., Papp L.A., Murvai K.P., Kiraly S., Miklos I., Peter G., Pusztahelyi T., Pocsi I.* Striking mycotoxin tolerance and zearalenone elimination capacity of the decaying wood associated yeast Sugiyamaella novakii (Trichomonascaceae) // BMC Microbiology. – 2025. – Vol. 25. – Article 422. DOI: 10.1186/s12866-025-04145-7.
57. *Azizi T., Daneshyar M., Allymehr M., Tukmechi A., Behroozyar H.K., Jalali A.S.* Effect of a probiotic (Lactobacillus sp.), yeast (Saccharomyces cerevisiae) and mycotoxin detoxifier alone or in combination on performance, immune response and serum biochemical parameters in broilers fed deoxynivalenol-contaminated diets // Animal Production Science. – 2021. – Vol. 61. – P. 1553–1563. DOI: 10.1071/AN19728.
58. *Fu Y., Yang Q., Solairaj D., Godana E.A., Routledge M.N., Zhang H.* Biodegradation of mycotoxin patulin by the yeast Meyerozyma guilliermondii // Biological Control. – 2021. – Vol. 160. – Article 104692. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2021.104692.
59. *Zhang M., Wen Y., Luo X., Wang X., Li J., Liu A., He L., Chen S., Ao X., Yang Y., Zou L., Liu S.* Characterization, mechanism of cypermethrin biosorption by Saccharomyces cerevisiae strains YS81 and HP and removal of cypermethrin from apple and cucumber juices by inactive cells // Journal of hazardous materials. – 2021. – Vol. 407. – Article 124350. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124350.
60. *Becerra K., Ghosh S., Godoy L.* Pesticide and yeast interaction in alcoholic fermentation: A Mini-Review // Fermentation. – 2023. – Vol. 9. – Article 266. DOI: 10.3390/fermentation9030266.
61. *Jacqui T., Deroite A., Raynal C., Julien-Ortiz A., Camarasa C*. Detoxification capabilities of copper and pesticides by winemaking yeasts. // OENO One. – 2025. – Vol. 59. – Article 9438. DOI: 10.20870/oeno-one.2025.59.4.9438.
62. *Stoyanova K., Gerginova M., Peneva N., Dincheva I., Alexieva Z.* Biodegradation and utilization of the pesticides glyphosate and carbofuran by two yeast strains // Processes. – 2023. – Vol. 11. – Article 3343. DOI: 10.3390/pr11123343.
63. *Danouche M., El Arroussi H., Bahafid W., El Ghachtouli N.* An overview of the biosorption mechanism for the bioremediation of synthetic dyes using yeast cells // Environmental Technology Reviews. – 2021. – Vol. 10. – P. 58–76. DOI: 10.1080/21622515.2020.1869839.
64. *Azeez R.A., Al-Zuhairi F.K.I.* Biosorption of dye by immobilized yeast cells on the surface of magnetic nanoparticles // Alexandria Engineering Journal. – 2022. –Vol. 61. – P. 5213–5222. DOI: 10.1016/j.aej.2021.10.044.
65. *Al-Tohamy R., Kenawy E.R., Sun J., Ali, S.S.* Performance of a newly isolated salt-tolerant yeast strain Sterigmatomyces halophilus SSA-1575 for azo dye decolorization and detoxification. // Frontiers in Microbiology. – 2020. – Vol. 11. – Article 1163. DOI: 10.3389/fmicb.2020.01163.

66. *Ruscasso F., Bezus B., Garmendia G., Vero S., Curutchet G., Cavello I., Cavalitto S.* Debaryomyces hansenii F39A as biosorbent for textile dye removal // Revista Argentina de Microbiología. – 2021. – Vol. 53. – P. 257–265. DOI: 10.1016/j.ram.2020.10.004.

67. *Wang X., Wang Y., Ning S., Shi S., Tan L.* Improving azo dye decolorization performance and halotolerance of Pichia occidentalis A2 by static magnetic field and possible mechanisms through comparative transcriptome analysis // Frontiers in microbiology. – 2020. – Vol. 11. – Article 712. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00712.

68. *Kurade M.B., Waghmode T.R., Xiong J.Q., Govindwar S.P., Jeon B.H.* Decolorization of textile industry effluent using immobilized consortium cells in upflow fixed bed reactor. // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 213. – P. 884–891. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.218.

69. *Ali S.S., Al-Tohamy R., Koutra E., El-Naggar A.H., Kornaros M., Sun J.* Valorizing lignin-like dyes and textile dyeing wastewater by a newly constructed lipid-producing and lignin modifying oleaginous yeast consortium valued for biodiesel and bioremediation // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 403. – Article 123575. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123575.

70. *Al-Tohamy R., Ali S.S., Xie R., Schagerl M., Khalil M.A., Sun J.* Decolorization of reactive azo dye using novel halotolerant yeast consortium HYC and proposed degradation pathway // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2023. – Vol. 263. – Article 115258. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115258.

71. *Eltarahony M., El-Fakharany E., Abu-Serie M., ElKady M., Ibrahim A*. Statistical modeling of methylene blue degradation by yeast-bacteria consortium; optimization via agro-industrial waste, immobilization and application in real effluents // Microbial Cell Factories. – 2021. – Vol. 20. – Article 234. DOI: 10.1186/s12934-021-01730-z.

72. *Kovács R., Majoros L.* Fungal quorum-sensing molecules: A Review of their antifungal effect against Candida biofilms // Journal of Fungi. – 2020. – Vol. – 6. – Article 99. DOI: 10.3390/jof6030099.

73. *Kovács R., Jakab Á.* The effects of tyrosol on yeasts: an overview of current knowledge // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2025. – Vol. 109. – Article 201. DOI: 10.1007/s00253-025-13595-y.

74. *Huang X.F., Reardon K.F.* Quorum-sensing molecules increase ethanol yield from Saccharomyces cerevisiae // FEMS Yeast Research. – 2021. – Vol. 21. – Article foab056. DOI: 10.1093/femsyr/foab056.

75. *Zhang D., Wang F., Yu Y., Ding S., Chen T., Sun W., Liang C., Yu B., Ying H., Liu D., Chen Y.* Effect of quorum-sensing molecule 2-phenylethanol and ARO genes on Saccharomyces cerevisiae biofilm // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2021. – Vol. 105. – P. 3635–3648. DOI: 10.1007/s00253-021-11280-4.

76. *Li L., Pan Y., Zhang S., Yang T., Li Z., Wang B., Sun H., Zhang M., Li X*. Quorum sensing: cell-to-cell communication in Saccharomyces cerevisiae // Frontiers in Microbiology. – 2023. – Vol. 14. – Article 1250151. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1250151.

77. *Rodrigues C.F., Černáková L.* Farnesol and tyrosol: secondary metabolites with a crucial quorum-sensing role in Candida biofilm development // Genes. – 2020. – Vol. 11. – Article 444. DOI: 10.3390/genes11040444.

78. *Dižová S., Bujdáková H.* Properties and role of the quorum sensing molecule farnesol in relation to the yeast Candida albicans // Pharmazie. – 2017. – Vol. 72.– P.307-312. DOI: 10.1691/ph.2017.6174.

79. *Nath B.J., Das K.K., Talukdar R., Sarma H.K.* Tyrosols retrieved from traditionally brewed yeasts assist in tolerance against heavy metals and promote the growth of cells // FEMS Microbiology Letters. – 2021. – Vol. 368. – Article fnab152. DOI: 10.1093/femsle/fnab152.

80. *Zhang Q., Xiang J., Lv W., Liu Y., Sun J., Wan P., Jiang L.* Quorum sensing molecules in yeast wastewater treatment and their regulation of yeast cell morphology // Journal of Water Process Engineering – 2022. – Vol. 49. – Article 103191. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103191.

81. *Tang J., Liu Y., Lai F., Zhou Y., Zhang H., Ni B.J., Lv W.* Zinc ions suppress filamentation of Candida tropicalis and enhance stability of yeast-based oil-rich wastewater treatment // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2026. – Vol. 14. – Article 121504. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121504.

82. *Sooklim C., Samakkarn W., Thongmee A., Duangphakdee O., Soontorngun N*. Enhanced aroma and flavour profile of fermented Tetragonula pagdeni Schwarz honey by a novel yeast T. delbrueckii GT-ROSE1 with superior fermentability // Food Bioscience. – 2022. – Vol. 50. – Article 102001. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.102001.

83. *Nath B.J., Mishra A.K., Sarma H.K.* Assessment of quorum sensing effects of tyrosol on fermentative performance by chief ethnic fermentative yeasts from northeast India // Journal of Applied Microbiology. – 2021. – Vol. 131. – P. 728–742. DOI: 10.1111/jam.14908.

84. *Tian J., Lin Y., Su X., Tan H., Gan C., Ragauskas A.J*. Effects of Saccharomyces cerevisiae quorum sensing signal molecules on ethanol production in bioethanol fermentation process // Microbiological Research. – 2023. – Vol. 271. – Article 127367. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127367.

85. *Huang X.F., Reardon K.F.* Strategies to achieve high productivity, high conversion, and high yield in yeast fermentation of algal biomass hydrolysate // Engineering in Life Sciences. – 2022. – Vol. 22. – P.119–131. DOI: 10.1002/elsc.202100095.

86. *Ma R., Huang Z., Jiang Y., Zhao A., Yu G., Lin C., Zhu L., Zhang X., Li X., Wang, C*. Regulation of ethanol production from anaerobic fermentation of food waste using aromatic alcohol-based quorum-sensing molecules // Journal of Environmental Management. – 2025. – Vol. 376. – Article 124382. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124382.

87. *Rosiana S., Zhang L., Kim G.H., Revtovich A.V., Uthayakumar D., Sukumaran A., Gedde-McAlister J., Kirienko N.V., Shapiro R.S*. Comprehensive genetic analysis of adhesin proteins and their role in virulence of Candida albicans // Genetics. – 2021. – Vol. 217. – Article iyab003. DOI: 10.1093/genetics/iyab003.

88. *Jung P., Mischo C.E., Gunaratnam G., Spengler C., Becker S.L., Hube B., Jacobs K., Bischoff M.* Candida albicans adhesion to central venous catheters: Impact of blood plasma-driven germ tube formation and pathogen-derived adhesins. // Virulence. – 2020. – Vol. – 11. – P. 1453–1465. DOI: 10.1080/21505594.2020.1836902.

89. *Gaálová-Radochová B., Kendra S., Jordao L., Kursawe L., Kikhney J., Moter A., Bujdáková H*. Effect of quorum sensing molecule farnesol on mixed biofilms of Candida albicans and Staphylococcus aureus. // Antibiotics. – 2023. – Vol. 12. – Article 441. DOI: 10.3390/antibiotics12030441.

90. *Efremenko E., Stepanov N., Senko O., Maslova O., Lyagin I., Domnin M., Aslanli A*. "Stop, little pot" as the motto of suppressive management of various microbial consortia. // Microorganisms. – 2024. – Vol. 12. – Article 1650. DOI: 10.3390/microorganisms12081650.

91. *del Rosario Agustín M., Tarifa M.C., Vela-Gurovic M.S., Brugnoni L.I.* Application of natamycin and farnesol as bioprotection agents to inhibit biofilm formation of yeasts and foodborne bacterial pathogens in apple juice processing lines // Food Microbiology. – 2023. – Vol. 109. – Article 104123. DOI: 10.1016/j.fm.2022.104123.

92. *Touil H.F.Z., Boucheri, K., Boucherit-Otmani Z., Kohder G., Madkour M., Soliman S.S.M*. Optimum inhibition of amphotericin-B-resistant Candida albicans strain in single- and mixed-species biofilms by Candida and Non-Candida terpenoids // Biomolecules. – 2020. – Vol. 10. – Article 342. DOI: 10.3390/biom10020342.

93. *Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Efremenko E.* "Universal" antimicrobial combination of bacitracin and His6-OPH with lactonase activity, acting against various bacterial and yeast cells // International Journal of Molecular Sciences. – 2022. – Vol. 23. – Article 9400. DOI: 10.3390/ijms23169400.

94. *Efremenko E., Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Senko O.* Enzymes with lactonase activity against fungal quorum molecules as effective antifungals. // Biomolecules. – 2024. – Vol. 14. – Article 383. DOI: 10.3390/biom14030383.

95. *Aslanli A., Domnin M., Stepanov N., Senko O., Efremenko E.* Action enhancement of antimicrobial peptides by their combination with enzymes hydrolyzing fungal quorum molecules. // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 280. – Article 136066. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.136066.

96. *Efremenko E., Stepanov N., Senko O., Aslanli A., Maslova O., Lyagin I.* Using fungi in artificial microbial consortia to solve bioremediation problems // Microorganisms. – 2024. – V. 12 – Article 470. DOI: 10.3390/microorganisms12030470.

97. *Mittermeier F., Bäumler M., Arulrajah, P., García Lima J.J., Hauke S., Stock A., Weuster-Botz D.* Artificial microbial consortia for bioproduction processes // Engineering in Life Sciences. – 2022. – Vol. 23. – Article e2100152. DOI: 10.1002/elsc.202100152.

98. *Jiang Y., Wu R., Zhang W., Xin F., Jiang, M.* Construction of stable microbial consortia for effective biochemical synthesis // Trends in Biotechnology. – 2023. – Vol. 41. – P.1430–1441. DOI: 10.1016/j.tibtech.2023.05.008.

99. *Efremenko E., Stepanov N., Maslova O., Senko O., Aslanli A., Lyagin I*. "Unity and struggle of opposites" as a basis for the functioning of synthetic bacterial immobilized consortium that continuously degrades organophosphorus pesticides. // Microorganisms. – 2022. – Vol. 10 – Article 1394. DOI: 10.3390/microorganisms10071394.

100. *Darvishi F., Rafatiyan S., Abbaspour Motlagh Moghaddam M. H., Atkinson E., Ledesma-Amaro R.* Applications of synthetic yeast consortia for the production of native and non-native chemicals // Critical Reviews in Biotechnology. – 2024. – Vol. 44. – P. 15–30. DOI: 10.1080/07388551.2022.2118569.

101. *Stepanov N., Senko O., Aslanli A., Maslova O., Efremenko E*. Enhanced biogas production from glucose and glycerol by artificial consortia of anaerobic sludge with immobilized yeast // Fermentation. – 2025. – Vol. 11. – Article 352. DOI: 10.3390/fermentation11060352.

102. *Maslova O., Senko O., Stepanov N., Gladchenko M., Gaydamaka S., Akopyan A., Eseva E., Anisimov A., Efremenko E.* Sulfur containing mixed wastes in anaerobic processing by new immobilized synthetic consortia // Bioresource Technology. – 2022. –Vol. 362. – Article 127794. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127794.

103. *Maslova O., Senko O., Stepanov N., Gladchenko M., Gaydamaka S., Akopyan A., Polikarpova P., Lysenko S., Anisimov A., Efremenko E*. Formation and use of anaerobic consortia for the biotransformation of sulfur-containing extracts from pre-oxidized crude oil and oil fractions // Bioresource Technology. – 2021. – Vol. 319. – Article 124248. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124248.

104. *Elsamahy T., Sun J., Elsilk S.E., Ali S.S.* Biodegradation of low-density polyethylene plastic waste by a constructed tri-culture yeast consortium from wood-feeding termite: Degradation mechanism and pathway // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 448. – Article 130944. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130944.

105. *Kučić Grgić D., Milološa M., Ocelić Bulatović V., Ukić Š., Slouf M., Gajdosova V.* Screening the efficacy of a microbial consortium of bacteria and fungi isolated from different environmental samples for the degradation of LDPE/TPS films // Separations. – 2023. – Vol. 10. – Article 79. DOI: 10.3390/separations10020079.

106. *Tunalı Boz D., Tansel Yalçın H., Çorbacı C.Ç., Bahriye Uçar, F.* Screening and molecular characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons degrading yeasts // Turkish Journal of Biochemistry. – 2015. – Vol. 40. – P. 105–110. DOI: 10.5505/tjb.2015.16023.

107. *Mandal S.K., Das N*. Biodegradation of perylene and benzo[ghi]perylene (5-6 rings) using yeast consortium: Kinetic study, enzyme analysis and degradation pathway // Journal of Environmental Biology. – 2018. – Vol. 39. – P. 5–15. DOI: 10.22438/jeb/39/1/MRN-540.

108. *Mandal S.K., Selvi A., Das N.* A novel approach on degradation of benzo[a]pyrene by yeast consortium isolated from contaminated soil // Pharma Letter. – 2016. – Vol. 8. – P. 80–93.

109. *Kamyabi A., Nouri H., Moghimi H.* Characterization of pyrene degradation and metabolite identification by Basidioascus persicus and mineralization enhancement with bacterial-yeast co-culture // Ecotoxicology and Environmental Safety – 2018. – Vol. 163. – P. 471–477. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.07.098.

110. *Hesham A.E.-L., Khan S., Tao Y., Li D., Zhang Y., Yang M.* Biodegradation of high molecular weight PAHs using isolated yeast mixtures: Application of metagenomic methods for community structure analyses // Environmental Science and Pollution Research. – 2012. – Vol. 19. – P. 3568–3578. DOI: 10.1007/s11356-012-0919-8.

111. *Senko O, Maslova O, Stepanov N, Aslanli A, Lyagin I, Efremenko E*. Role of humic substances in the (bio)degradation of synthetic polymers under environmental conditions // Microorganisms – 2024 – V. 12. – Article 2024. DOI: 10.3390/microorganisms12102024.

112. *Ефременко Е.Н., Лягин И.В., Маслова О.В., Сенько О.В., Степанов Н.А., Асланлы А.Г.* Каталитическое разложение микропластиков // Успехи химии. – 2023. – Т. 92. – № 2. – Статья RCR5069. DOI: 10.57634/RCR5069.

113. *Chen H., Peng H., Ellis T., Ledesma-Amaro R*. Programmable cell–cell adhesion in synthetic yeast communities for improved bioproduction // Nature Chemical Biology. – 2026. – DOI: 10.1038/s41589-025-02081-1.

114. *Louhasakul Y., Cheirsilp B., Maneerat S., Prasertsan P*. Potential use of flocculating oleaginous yeasts for bioconversion of industrial wastes into biodiesel feedstocks // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 136. – P. 1311–1319. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.002.

Благодарности:
Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема № 121041500039-8 Молекулярный дизайн, структурно-функциональный анализ и регуляция ферментных систем, клеточных конструкций, бионаноматериалов: фундаментальные основы и приложения в технологии, медицине, охране окружающей среды).

Для цитирования:
Ефременко Е.Н., Степанов Н.А. Дрожжи в микробных консорциумах, осуществляющих биодеградацию органических экополлютантов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 3. – С. 72–92. https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.3.5

Сведения об авторах:
Ефременко Елена Николаевна, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией экобиокатализа, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, («МГУ им. Ломоносова»), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 3; e-mail: elena_efremenko@list.ru, ORCID: 0000-0002-6992-854X
Степанов Николай Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории экобиокатализа, «МГУ им. Ломоносова»; e-mail: na.stepano@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0821-8226

YEAST IN MICROBIAL CONSORTIA MEDIATING THE BIODEGRADATION OF ORGANIC ECOPOLLUTANTS

Efremenko E.N., Stepanov N.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Among microbial destructors of organic ecopollutants, yeast occupies a special place due to its ability to form consortia with various microorganisms. The study analyzes the most common partners of yeast cells in natural microbial consortia, and also identifies ecopollutants, whose degradation in contaminated environments under the influence of polymicrobial biosystems has been most thoroughly studied. Such ecopollutants include petroleum hydrocarbons, mycotoxins, fungicides, dyes, and synthetic polymers. A significant role of various yeast enzyme systems has been noted in their biodegradation. The natural chemical composition of yeast cell walls, as well as their ability to synthesize and intracellularly accumulate certain proteins and peptides, provide yeast cells with a powerful sorption potential in relation to various heavy metals that distinguish them from other microorganisms. The sorption characteristics of yeast are important not only for removing environmental pollutants from different media, but also for reducing their negative effects on other microorganisms in consortia with yeast. It is discussed that the maximum degree and rates of biodegradation of ecopollutants present in aquatic environments are achieved by consortia containing high concentrations of yeast cells. Special attention is paid to the formation of the quorum response in yeast and its

role in regulating the properties displayed by cells in consortia. It has been noted that the intensity of biofilm development as a manifestation of quorum in consortia can be regulated by controlling the concentration of specific quorum molecules. The possibilities and prospects of constructing artificial consortia involving yeast are discussed. The information presented provides an understanding of the role of yeast consortia in the biodegradation processes of organic ecopollutants which are highly in demand in the contemporary world.

Keywords*: quorum sensing, biocatalysts, artificial consortia, petroleum hydrocarbons, mycotoxins, fungicides, dyes, synthetic polymers*

Поступила в редакцию: 25.05.2026
Принята к публикации: 06.07.2026