BIOMICS/БИОМИКА

ISSN 2221-6197 http://biomicsj.ru

ПЕРОКСИДАЗЫ БАКТЕРИЙ В БИОРЕМЕДИАЦИИ

[1]Угринова Ю.Д., [1,2]Чубукова О.В., [1,2]Хакимова Л.Р.,[1,2]Вершинина З.Р.*

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Школа молекулярных технологий», Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

[2]Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Россия, 450054, Уфа, пр. Октября 71, лит.1Е.
*E-mail: zilyaver@mail.ru

Резюме

В мире все более острой становится проблема загрязнения окружающей среды трудноразлагаемыми токсичными соединениями, образующимися в результате работы промышленных предприятий, сельскохозяйственного производства и других видов деятельности человека. Различные физические и химические методы рекультивации и ремедиации имеют серьезные ограничения, такие как высокая стоимость, трудоемкость, а также нарушение эколого-трофической структуры и сукцессионные изменения экосистем. Каталитическое разложение загрязняющих веществ с помощью ферментов может составить конкуренцию классическим методам очистки окружающей среды от экополлютантов. Пероксидазы – широко распространенные ферменты, относящиеся к классу оксидоредуктаз, которые могут разрушать углеродный каркас сложных органических соединений. В этом обзоре представлены последние исследования в области применения бактериальных пероксидаз в качестве экологически чистых катализаторов для биоремедиации загрязненных экосистем.

Ключевые слова: пероксидаза, биоремедиация, бактерия, экополлютант, ксенобиотик

Цитирование: Угринова Ю.Д., Чубукова О.В., Хакимова Л.Р., Вершинина З.Р. Пероксидазы бактерий в биоремедмации // Biomics. 2024. Т.16(1). С. 138-148. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-8

© Авторы

BACTERIAL PEROXIDASES IN BIOREMEDIATION

[1]Ugrinova Yu.D., [1,2]Chubukova O.V., [1,2]Khakimova L.R., [1,2]Vershinina Z.R.*

[1]Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia
[2]Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia
*E-mail: zilyaver@mail.ru

Resume

As a result of the work of industrial enterprises, agricultural production and other types of human activity in the world, the problem of environmental pollution with difficult-to-degrade toxic compounds is becoming increasingly acute. Various physical and chemical methods of recultivation and remediation have serious limitations, such as high cost, labor intensity, as well as disruption of the ecological-trophic structure and successional changes in ecosystems. The catalytic decomposition of pollutants using

enzymes can compete with classical methods of cleaning the environment from pollutants. Peroxidases are widespread enzymes belonging to the class of oxidoreductases that can destroy the carbon backbone of complex organic compounds. This review presents recent research on the application of bacterial peroxidases as environmentally friendly catalysts for the bioremediation of contaminated ecosystems.

Key words: peroxidase, bioremediation, bacteria, ecopollutant, xenobiotic

Citation: Ugrinova Yu.D., Chubukova O.V., Khakimova L.R., Vershinina Z.R. Bacterial peroxidases in bioremediation. *Biomics*. 2024. V.16(1). P. 138-148. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-8 (In Russian)

© The Authors

Введение

Рост потребительского спроса является не только стимулом для увеличения объемов производства, но и приводит к образованию значительного количества отходов. Промышленный мусор - это один из главных загрязнителей окружающей среды во всем мире. Особенно опасны для экосистем отходы, содержащие синтетические красители, фенольные вещества, полициклические ароматические углеводороды, летучие органические соединения, полихлорированные дифенилы, пестициды и др. [Sellami et al., 2022].

На сегодняшний день используются различные физические и химические методы очистки загрязненных экосистем, такие как электрохимическая обработка, адсорбция загрязняющих веществ, ионный обмен, фильтрация через мембраны и др. [Ufarte et al., 2015]. Несмотря на эффективность этих традиционных методов, при высоких концентрациях загрязняющих веществ их оказывается недостаточно для снижения количества экополлютантов до допустимых значений [Malik, 2004]. Также к недостаткам традиционных методов очистки можно отнести высокую стоимость, неспецифичность и вероятность возникновения токсичных побочных продуктов, поэтому возрастает интерес к экологически чистым биологическим методам очистки, называемым биоремедиацией [Singh et al., 2008]. В биоремедиации важнейшую роль играют ферменты, которые могут разрушать или переводить в менее токсичную форму различные типы органических и неорганических загрязнителей, включая полиароматические углеводороды, азокрасители, полимеры, органоцианиды, свинец, хром и ртуть [Mousavi et al., 2021].

Среди хорошо изученных ферментов наибольшим потенциалом для биоремедиационных целей обладают пероксидазы, способные катализировать окисление различных химических соединений, используя пероксид водорода в качестве ко-субстрата [Hamid, Rehman, 2009; Husain, 2010; Chanwun et al., 2013; Pradeep et al., 2015]. Они могут широко применяться в биоремедиации для обезвреживания отходов текстильной, бумажно-целлюлозной, химической, лекарственной, косметической промышленности и др. [Draelos, 2015; Taboada-Puig et al., 2015; Falade et al., 2019a]. Так, пероксидазы используют для биоочистки сточных вод, загрязненных фенольными соединениями, для разложения текстильных красителей, а также удаления пероксида из продуктов питания и промышленных отходов [Chandra et al., 2011; Huber, Carre, 2012]. Эти ферменты широко распространены в природе, в том числе в растениях, животных и микроорганизмах [Bansal, Kanwar, 2013]. На протяжении многих лет считалось, что грибы являются источником наиболее эффективных пероксидаз [Ikehata et al., 2004, Urek, Pazarlioglu, 2007; Hariharan, Nambisan, 2013]. Тем не менее, было показано, что некоторые бактерии, в основном актинобактерии, также являются перспективными продуцентами для получения пероксидаз [Mercer et al, 1996; Tuncer et al., 2004; Tuncer et al., 2009; Musengi et al., 2014]. В последние годы, интерес к микробным пероксидазам начал расти, поскольку эти ферменты показали себя более стабильными, особенно в экстремальных условиях, чем пероксидазы растительного и животного происхождения [Anbu et al., 2017; Falade et al., 2019a].

Биоремедиация экосистем, загрязненных фенольными соединениями и нефтепродуктами

Ароматические соединения, включая фенолы и ароматические амины, являются одним из основных классов загрязнителей окружающей среды, которые часто обнаруживаются в сточных водах различных отраслей промышленности, включая производство пластмасс, текстиля, красок, целлюлозы, бумаги, а также переработку угля и нефтепереработку [Huber, Carre, 2012; Bansal, Kanwar, 2013; Mohammadi et al., 2015; Dargahi et al., 2017; Sridhar et al., 2018; Sellami et al., 2022].

Пероксидазы являются важнейшими ферментами, способными катализировать окисление

широкого ряда фенольных соединений [Hakala et al., 2006; Longoria et al., 2008; Ruiz-Duenas et al., 2009; Mui et al., 2010; Karigar, Rao, 2011; Shekoohiya et al., 2016; Gore et al., 2017]. Ранее было описано разложение фенола пероксидазой в биореакторе при добавлении перекиси водорода для усиления синтеза внеклеточных пероксидаз микроорганизмами [Pourakbar et al., 2018]. Аналогично осуществлялась деградация производных фенола [Baratpour, Moussavi, 2018; Aghayani et al., 2019; Moussavi, Haddad, 2019] и углеводородов нефти [Moussavi et al., 2017].

Одним из перспективных классов прокариотических пероксидаз, использующихся в биоремедиации нефтяных загрязнений, являются каталазы [Khmelevtsova et al., 2020]. В работе Гоголевой с соавт. была показана прямая зависимость между снижением каталазной активности углеводородокисляющих микроорганизмов *Gordonia terrae*, *Rhodococcus rubropertinctus* и *R. erythropolis* и интенсивностью деструкции нефтепродуктов [Gogoleva et al., 2012].

Полиароматические углеводороды (ПАУ) состоят из двух или более конденсированных ароматических колец и входят в состав сырой нефти, креозота и угля [Harayama, 1997]. Пероксидазы и фенолоксидазы могут действовать на определенные ПАУ, превращая их в менее токсичные вещества или соединения, которые легче разлагаются в природе в дальнейшем [Bansal, Kanwar, 2013]. Показано, что ПАУ могут окислять лигнин-пероксидазы [Weber et al., 2008] и марганцевые пероксидазы [Harford-Cross et al., 2000] прокариот.

Обесцвечивание синтетических красителей

Синтетические красители широко используются во многих отраслях промышленности [Gopi et al., 2012; Bansal, Kanwar, 2013; Rajkumar et al., 2013; Nayanashree, Thippeswamy et al., 2015], и отходы таких производств представляют собой одну из наиболее проблемных групп ксенобиотиков, трудно поддающихся биоразложению [Anjaneyulu et al., 2005; Ong et al., 2011; Twala et al., 2020]. В последние годы для разрушения синтетических красителей начали активно использовать пероксидазы из различных живых организмов, такие как лакказа, марганцевая пероксидаза и лигнин-пероксидаза [Tien et al., 1988; Kirby et al., 1995; Bansal, Kanwar, 2013]. И, хотя большинство этих ферментов имеют грибковое происхождение, известен ряд штаммов, чьи пероксидазы можно использовать для эффективного обесцвечивания синтетических текстильных красителей: *B. cereus* DC11, *B. subtilis*, *Sphingomonas paucimobilis* и *Staphylococcus epidermidis* [Kanwar, Bansal, 2014; Khelil et al., 2015]. Было показано, что бактерия *Aeromonas hydrophila* способна деградировать краситель кристаллический фиолетовый и снижать его токсичность благодаря своим лигнинолитическим ферментам – лигнин-пероксидазе и лакказе [Bharagava et al, 2018; Khmelevtsova et al., 2020].

Было изучено обезвреживание Cr (VI) и азокрасителя Acid Orange 7 (AO7) с помощью *Brevibacterium casei* в условиях ограничения питательных веществ. Восстановленный Cr(III) в комплексе с окисленным AO7 образовывал пурпурный интермедиат [Ng et al., 2010].

Внеклеточная пероксидаза, выделенная из *Bacillus* sp., оказалась способна обесцвечивать 16 различных промышленных красителей, таких как фуксин основной, родамин B, метиленовый синий и малахитовый зеленый. Было обнаружено, что термостабильная пероксидаза из *B. stearothermophilus* эффективна для обесцвечивания красителей с высоким окислительно-восстановительным потенциалом, таких как Reactive Blue 5 и Reactive Black 5 [Kanwar, Bansal, 2014]. Также было показано, что пероксидазы, полученные из *Bacillus* spp. R2 и *B. cereus* 11778, обесцвечивают три синтетических красителя: метиленовый синий, нейтральный красный и конго красный. Эти исследования выявили перспективность использования ферментов *Bacillus* в качестве эффективных деколоризаторов большинства синтетических красителей [Twala et al., 2020]. Ранее сообщалось, что был найден штамм *Pseudomonas mendocina*, способный разлагать смешанные азокрасители при щелочном pH. Было показано, что марганцевая пероксидаза из штамма *Bjerkandera adusta* CX-9 обесцвечивает различные красители, включая индигокармин, Remazol Brilliant Violet 5R, Remazol Brilliant Blue Reactif, Poly R-478, Cibacet Brilliant Blue BG и Acid Blue 158 [Bouacem et al., 2018], а штаммы *Bjerkandera adusta* DSM 11310 и *Pleurotus eryngii* ATCC 90787 обесцвечивали четыре азо- и два фталоцианиновых красителя [Heinfling et al., 1998].

Разложение пестицидов

Пестициды, широко применяемые в сельском хозяйстве для борьбы с насекомыми, сорняками и фитопатогенами, часто становятся причиной загрязнения почвы и воды [Leu et al., 2004]. Эти химические вещества известны своим неблагоприятным воздействием на здоровье человека, в т.ч. из-за кацерогенных и тератогенных свойств [McCauley et al., 2006]. Биологическое разложение пестицидов с помощью пероксидаз микроорганизмов широко изучается как наиболее безопасный и эффективный способ удаления этих соединений из окружающей среды [Pizzul et al., 2009; Bansal, Kanwar, 2013]. Например, подробно был исследован механизм

превращения 3,4-дихлоранилина в 4,4-тетрахлоразобензол под действием пероксидаз, продуцируемых почвенными микробами [Rangasam et al., 2018]. Была показана биологическая трансформация гербицида триазин (гексагидро-1,3,5-тринитро-1,3,5-триазин) при его инкубации в образце почвы, содержащем штамм *Rhodococcus* sp. DN22 [Sellami et al., 2022].

Наиболее часто используемыми гербицидами являются 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота (2,4-Д) и 2,4,5-трихлорфеноксиуксусная кислота (2,4,5-Т). 2,4-Д и, возможно, 2,4,5-Т являются компонентом агента Оранж, который широко использовался в качестве дефолианта. 2,4-Д весьма восприимчив к бактериальному разложению и обычно недолго сохраняется в природе. С другой стороны, 2,4,5-Т относительно устойчив и имеет свойство накапливаться в окружающей среде [Bansal, Kanwar, 2013]. Из почвы, загрязненной имазетапиром, был выделен штамм *Pseudomonas* sp. IM-4, способный разрушать данный гербицид. Эта бактерия также продемонстрировала способность разлагать другие имидазолиноновые гербициды, такие как имазапир, имазапик и имазамокс [Huang et al., 2009].

Разложение пластмасс и резины

Ежегодно во всем мире производится около 300 миллионов тонн пластика, при этом из них 80% составляет производство полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), поливинилхлорида (ПВХ), полистирола (ПС), полиуретана (ПУ) и полиэтилентерефталата (ПЭТ) [Twala et al., 2020]. Исследования показали, что пластиковые отходы представляют значительную угрозу для домашних животных и морских обитателей, способствуя уничтожению экосистем [Pathak, Navneet, 2017].

Известно, что биоразложение пластмасс крайне затруднено из-за отсутствия гидролизуемых функциональных групп в углеродных цепях [Restrepo-Florez et al., 2014; Krueger et al., 2015]. Обычно, степень разложения зависит от структуры полимера. Полная биологическая деградация состоит из двух стадий: распад полимера на более мелкие олигомеры и возможное прохождение мономеров через клеточную мембрану, за которым следует ассимиляция и последующий внутриклеточный метаболизм [Wilkes, Aristilde, 2017]. Таким образом, в окружающей среде ослаблению структуры пластика способствует комбинированное воздействие на него как биотических, так и абиотических факторов, а затем эти вещества могут подвергнуться микробной деградации. [Sowmya et al., 2014; Krueger et al., 2015]. Многие штаммы *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Arthrobacter* spp. изучались в качестве потенциальных деструкторов различных полимеров благодаря высоким показателям активности своих ферментов, таких как лакказы, липазы, лигнин-пероксидазы, марганцевые пероксидазы, эстеразы и амилазы [Sowmya et al., 2014a; Ganesh et al., 2017].

ПЭ может подвергаться химическому, термическому, фото- и биоразложению [Sowmya et al., 2014b]. Сообщалось, что он может эффективно разлагаться несколькими видами бактерий с помощью амилаз, лакказ, марганцевых пероксидаз и др. [Khatoon et al., 2019]. Штаммы *Pseudomonas* и *Arthrobacter* spp., выделенные из морских экосистем, синтезируют ферменты, которые оказались способны эффективно разрушать ПЭ высокой плотности [Wilkes, Aristilde, 2017]. Лакказы и марганцевые пероксидазы из штамма *B. cereus*, выделенного из свалок в Карнатаке (Индия), были показаны как ключевые ферменты для деградации ПЭ [Sowmya et al., 2014c].

Для ПУ характерно наличие уретановых групп и карбаматных связей. Этот обширный класс синтетических гетероцепных полимеров, иногда сильно отличающихся друг от друга строением углеродного скелета, химической природой и свойствами, по некоторым физико-механическим параметрам превосходит не только все типы резин, каучуков, но и металлы [Wilkes, Aristilde, 2017]. ПУ нерастворим в обычных растворителях, но, несмотря на его устойчивость было показано, что некоторые виды *Pseudomonas*, такие как *P. fluorescens, P. aeruginosa и P. protegens*, а также *B. subtilis* МЗА-75 могут эффективно разлагать ПУ [Wei, Zimmermann, 2017; Wilkes, Aristilde, 2017].

ПП является вторым по распространенности синтетическим материалом в мире [Krueger et al., 2015] и вместе с ПВХ и ПЭТ относятся к числу наименее подверженных биоразложению пластиков [Wilkes, Aristilde, 2017]. Эти три полимера обладают высокой гидрофобностью и устойчивостью к химическим веществам, а также термической и химической стабильностью, следовательно, они устойчивы к биоразложению как после предварительной химической обработкой, так и без нее [Wilkes, Aristilde, 2017]. Но, несмотря на стабильность, в различных исследованиях сообщалось о биоразложении этих полимеров под действием микробных ферментов [Khatoon et al., 2019].

Натуральный каучук (НК) или цис-1,4-полиизопрен является одним из наиболее широко используемых полимеров, и отслужившие свой срок изделия из него представляют проблему для окружающей среды [Twala et al., 2020]. С 1914 года предпринимались различные попытки обнаружить микроорганизмы, разлагающие каучук, но, к сожалению, биохимические механизмы разрушения

каучука до сих пор неизвестны [Nayanashree, Thippeswamy, 2015]. Каучук очень устойчив к высоким температурам, также его сложно перерабатывать после вулканизации (превращения в резину), при которой происходит сшивание молекул каучука в единую пространственную сетку. Таким образом, во всем мире активно ведутся поиски ферментов и микроорганизмов, способных эффективно разлагать каучук и резину. Например, исследования, проводимые в Карнатаке (Индия), продемонстрировали положительные результаты на резиновых дисках, погруженных в почву для изучения их биоразложения. На дисках, которые извлекали из почвы через регулярные промежутки времени (2, 4 и 6 месяцев), были обнаружены различные бактериальные изоляты, принадлежащие к видам *Pseudomonas* и *Bacillus* spp. [Nayanashree et al., 2014]. Среди этих штаммов бактерий преобладал *Bacillus subtilis*, именно его ферменты - лакказа и пероксидаза марганца — оказались ответственны за деградацию натурального каучука [Twala et al., 2020].

Пероксидазы как биосенсоры

Биосенсоры это аналитические устройства, которые тесно сочетают в себе элементы биораспознавания с физическими преобразователями для обнаружения целевого соединения [Bansal, Kanwar, 2013]. Принцип работы очень прост: иммобилизованный биоэлемент (например, фермент) распознает целевую молекулу в сложной среде, и преобразователь превращает биологическую реакцию в измеримый электрический сигнал, который коррелирует с концентрацией целевого вещества [Sellami et al., 2022]. Благодаря своей высокой селективности и чувствительности, низкой стоимости, адаптируемой конструкции и быстрому времени отклика применение биосенсоров оказалось более выгодным по сравнению с другими аналитическими методами [Song et al., 2011]. Так, биосенсоры широко используются в медицинской диагностике, для обнаружении патогенов и токсинов в воде и пищевых продуктах, а также в мониторинге окружающей среды, например для обнаружения пестицидов [Leung et al., 2007]. Пероксидазы продемонстрировали огромный потенциал в качестве биоаналитического инструмента и широко используются при разработке биосенсоров с 90-х годов прошлого века [Ruzgas et al., 1996]. Несмотря на то, что подавляющее большинство электрохимических биосенсоров на основе пероксидаз использовались для определения H_2O_2, также были разработаны приборы для обнаружения фенольных соединений, в том числе фенола, катехола, гидрохинона, резорцина, ванилина и 4-хлор-3-метилфенола [Rosatto et al., 1999].

Использование пероксидаз в целлюлозно-бумажной промышленности

Производство целлюлозы включает в себя два основных процесса: варку древесины и отбеливание [Bansal, Kanwar, 2013]. На первом этапе щепа подвергается сульфатной варке, называемой также процессом Крафта, при повышенной температуре и давлении для расщепления на волокнистую массу [Khalid et al., 2009]. Химическая реакция растворяет лигнин, освобождая волокна целлюлозы, затем производные лигнина удаляются в процессе промывки и обезвоживания. Образовавшиеся вязкие щелочные отходы представляют из себя смесь производных лигнина, целлюлозы, фенольных соединений, смол, жирных кислот и дубильных веществ, это так называемый черный (сульфатный) щелок, чрезвычайно токсичный для окружающей среды [Grover et al., 1999]. Наиболее экономичными и экологичными являются биологические методы обезвреживания черного щелока с использованием грибов, бактерий, водорослей и ферментов в сочетании с физическими и химическими методами [Chandra et al., 2011].

Лигнин — один из основных компонентов клеточной стенки растений, который трудно разложить с помощью ферментов [Weng et al., 2008]. Было разработано несколько стратегий деполимеризации лигнина в лигноцеллюлозных материалах, включая физические и химические методы [Sellami et al., 2022]. Однако современные подходы к делигнификации слишком дороги и экономически не оправданы [Hamelinck et al., 2005]. Ферментативное разрушение лигнина является дешевой альтернативой, благодаря меньшему потреблению энергии при сохранении той же эффективности преобразования, и отсутствию дополнительных химических реагентов [Sun and Cheng, 2002]. Эффективность последнего метода обусловлена четырьмя основными группами биокатализаторов: лигнин-пероксидазы, марганцевые пероксидазы, универсальные пероксидазы и лакказы [Wang et al., 2013; Furukawa et al., 2014; Falade et al., 2017; Garlapati et al., 2020].

Поиск эффективных лигнинолитических ферментов с высокой стабильностью — это перспективное направление современных биоремедиационных исследований. Так, недавно был показан ферментативный потенциал термофильной бактерии *Thermobacillus xylanilyticus* для производства устойчивых лигнинолитических ферментов. В геноме этого штамма был идентифицирован ген, кодирующий термостабильную каталазу-пероксидазу (Fall et al., 2023). Недавние исследования показали, что использование сельскохозяйственных отходов (опилок, пшеничной соломы, пшеничных отрубей,

кукурузной соломы, кукурузных початков, кожуры мандарина и т. д.) позволяет повысить производство лигнинолитических ферментов микроорганизмами [Ijoma et al., 2018; Unuofin et al. 2019; Falade et al. 2019b]. Например добавление кукурузной соломы позволило улучшить синтез лакказы двумя штаммами γ-протеобактерий [Unuofin et al. 2019]. Сообщалось об использовании сельскохозяйственных отходов для повышения секреции пероксидазы видами *Raoultella* [Falade et al. 2019b]. Был изучен потенциал применения широкого ряда сельскохозяйственных отходов, включая рисовые отруби, пшеничные отруби, опилки, банановую кожуру, апельсиновую кожуру, картофельную кожуру, гороховую кожуру и жом сахарного тростника, для повышения выхода лакказы штаммом *Bacillus sp*. AKPK01 [Kumar et al., 2020]. Тем не менее, вопрос об использовании лигноцеллюлозных отходов для производства пероксидаз разными видами бактерий требует подробного дальнейшего изучения [Falade et al., 2020].

Заключение

Пероксидазы — разнообразная группа ферментов, являющаяся важнейшим компонентом антиоксидантной системы микроорганизмов. Эволюция пероксидаз привела к появлению мультифункциональных белков, обладающих способностью окислять множество субстратов самой разной структуры: от галогенид-ионов до гидрохинонов и ароматических азосоединений. Это свойство нашло широкое применение в биремедиации как альтернатива химическим и физическим методам очистки окружающей среды от загрязнителей. Пероксидазы бактерий потенциально могут применяться в биоремедиации сточных вод, загрязненных фенолами, крезолами и другими промышленными стоками, для обесцвечивания текстильных красителей, деградации пестицидов, лигнина, нефти и нефтепродуктов, пластика и резины. Пероксидазы также используются в качестве биосенсоров для мониторинга состояния окружающей среды. На сегодняшний день перспективным является поиск новых термостабильных пероксидаз, устойчивых к органическим растворителям и тяжелым металлам, в частности для эффективного биоразложения пластиковых отходов в экстремальных условиях окружающей среды.

Литература / References

1. Aghayani E., Moussavi G., Naddafi K. Improved peroxidase-mediated biodegradation of toluene vapors in the moving-bed activated sludge diffusion (MASD) process using biosurfactant-generating biomass stimulated with H2O2. // *J. Hazard. Mater*. 2019. V. 361. P. 259–266. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.076
2. Anbu P.; Gopinath S.C.B., Cihan A.C., Chaulagain B.P. Microbial enzymes and their applications in industries and medicine. // *BioMed*. 2017. 2017:2195808. doi: 10.1155/2017/2195808
3. Anjaneyulu Y., Sreedhara Chary N., Samuel Suman Raj D. Decolourization of industrial effluents–available methods and emerging technologies–a review. // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2005. V. 4. P. 245-273. doi: 10.1007/s11157-005-1246-z
4. Bansal N., Kanwar S.S. Peroxidase(s) in environment protection. // *Sci World J.* 2013. doi: 10.1155/2013/714639
5. Baratpour P., Moussavi G. The accelerated biodegradation and mineralization of acetaminophen in the H_2O_2-stimulated upflow fixed-bed bioreactor (UFBR). // *Chemosphere*. 2018. V. 210. P. 1115–1123. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.07.135
6. Bharagava R.N., Mani S., Mulla S.I., Saratale G.D. Degradation and decolourization potential of an ligninolytic enzyme producing *Aeromonas hydrophila* for crystal violet dye and its phytotoxicity evaluation. // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 156. P. 166–175. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.012
7. Bouacem K., Rekik H., Jaouadi N.Z., Zenati B., Kourdali S., El Hattab M., Badis A., Annane R., Bejar S., HaceneH., Bouanane-Darenfed A., Jaouadi B. Purification and characterization of two novel peroxidases from the dye-decolorizing fungus *Bjerkandera Adusta* strain CX-9. // *Int. J. Biol. Macromolecules*. 2018. V. 106. P. 636–646. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.08.061
8. Chandra R., Abhishek A., Sankhwar M. Bacterial decolorization and detoxification of black liquor from rayon grade pulp manufacturing paper industry and detection of their metabolic products. // *Bioresource Technology*. 2011. V. 102 (11). P. 6429–6436. doi: 10.1016/j.biortech.2011.03.048
9. Chanwun T., Muhamad N., Chirapongsatonkul N., Churngchow N. *Hevea brasiliensis* cell suspension peroxidase: purification, characterization and application for dye decolorization. // *AMB Express*. 2013. V. 3. P. 14. doi: 10.1186/2191-0855-3-14
10. Dargahi A., Mohammadi M., Amirian F., Karami A., Almasi A. Phenol removal from oil refinery

wastewater using anaerobic stabilization pond modeling and process optimization using response surface methodology (RSM). // Desalination and Water Treatment. 2017. V. 87. P. 199-208. doi: 10.5004/dwt.2017.21064
11. Draelos Z.D. A split-face evaluation of a novel pigment-lightening agent compared with no treatment and hydroquinone. // *J. Am. Acad. Dermatol*. 2015. V. 72. P. 105–107. doi: 10.1016/j.jaad.2014.09.011
12. Falade A., Mabinya L., Okoh A., Nwodo U. Peroxidases produced by new ligninolytic bacillus strains isolated from marsh and grassland decolourized anthraquinone and azo dyes. // *Pol. J. Environ. Stud*. 2019. V. 28 (5) P. 3163–3172. doi: 10.15244/pjoes/92520
13. Falade A.O., Eyisi O.A.L., Mabinya L.V., Nwodo U.U., Okoh A.I. Peroxidase production and ligninolytic potentials of freshwater bacteria *Raoultella ornithinolytica* and *Ensifer adhaerens.* // *Biotechnol. Rep*. 2017. V. 16. P. 12–17. doi: 10.1016/j.btre.2017.10.001
14. Falade A., Jaouani A., Mabinya L., Okoh A., Nwodo, U. Exoproduction and molecular characterization of peroxidase from *Ensifer adhaerens.* // *Appl. Sci*. 2019a. V. 9 (15). P. 3121. doi: 10.3390/app9153121
15. Falade A.O., Mabinya L.V., Okoh A.I., Nwodo U.U. Agroresidues enhanced peroxidase activity expression by *Bacillus sp.* MABINYA-1 under submerged fermentation. // *Bioresources and Bioprocessing*. 2020. V. 7. P. 1-9. doi: 10.1186/s40643-020-00345-3
16. Fall I., Czerwiec Q., Abdellaoui S., Doumeche B., Ochs M., Remond C., Rakotoarivonina H. A thermostable bacterial catalase-peroxidase oxidizes phenolic compounds derived from lignins. // *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 2023. V. 107(1). P. 201-217. doi: 10.1007/s00253-022-12263-9
17. Furukawa T., Bello F.O., Horsfall L. Microbial enzyme systems for lignin degradation and their transcriptional regulation. // *Frontiers in Biology*. 2014. V. 9. P. 448-471. doi: 10.1007/s11515-014-1336-9
18. Ganesh P, Dineshraj D, Yoganathan K. Production and screening of depolymerising enymes by potential bacteria and fungi isolated from plastic waste dump yard sites. // *Int. J. Appl. Res*. 2017. V. 3. P. 693–695.
19. Garlapati V.K., Chandel A.K., Kumar S.J., Sharma S., Sevda S., Ingle A.P., Pant D. Circular economy aspects of lignin: towards a lignocellulose biorefinery. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020 V. 130. doi: 10.1016/j.rser.2020.109977
20. Gogoleva O.A., Nemtseva N.V., Bukharin O.V. Catalase activity of hydrocarbon-oxidizing bacteria. // *Applied Biochemistry and Microbiology.* 2012. V. 48 (6). P. 552-556. doi: 10.1134/S0003683812060051
21. Gopi V., Upgade A., Soundararajan N. Bioremediation potential of individual and consortium Non-adapted fungal strains on *Azo dye* containing textile effluent. // *Adv. Appl. Sci. Res*. 2012. V. 3. P. 303–311.
22. Gore S., Khotha A., Nevgi D. The use of horse radish peroxidase, an eco-friendly method for removal of phenol from industrial effluent. // *J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol*. 2017. V.11 P. 7–13. doi: 10.9790/2402-1103010713
23. Grover R., Marwaha S.S., Kennedy J.F. Studies on the use of an anaerobic baffled reactor for the continuous anaerobic digestion of pulp and paper mill black liquors. // *Process Biochemistry*. 1999. V. 34(6-7). P. 653–657. doi: 10.1016/S0032-9592(98)00138-1
24. Hakala T.K., Hilden K., Maijala P., Olsson C., Hatakka A. Differential regulation of manganese peroxidases and characterization of two variable MnP encoding genes in the white-rot fungus *Physisporinus rivulosus.* // *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 2006. V. 73(4). P. 839–849. doi: 10.1007/s00253-006-0541-0.
25. Hamelinck C.N., Van Hooijdonk G., Faaij A.P. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. // *Biomass and Bioenergy*. 2005. V. 28(4). P. 384-410. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.09.002
26. Hamid H., Rehman K.U. Potential applications of peroxidases. // *Food Chemistry*. 2009. V. 115(4). P. 1177–1186. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.02.035
27. Harayama S. Polycyclic aromatic hydrocarbon bioremediation design. // *Current Opinion in Biotechnology*. 1997. V. 8(3). P. 268–273. doi: 10.1016/S0958-1669(97)80002-X
28. Harford-Cross C.F., Carmichael A.B., Allan F.K., England P.A., Rouch D.A., Wong L.L. Protein engineering of cytochrome P458(cam) (CYP101) for the oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons. // *Protein Engineering*. 2000. V. 13(2). P. 121–128. doi: 10.1093/protein/13.2.121
29. Hariharan S., Nambisan P. Optimization of lignin peroxidase, manganese peroxidase and lac production from *Ganoderma lucidum* under solid state fermentation of pineapple leaf. //

BioResources. 2013. V. 8. P. 250–271. doi: 10.15376/biores.8.1.250-271
30. Heinfling A., Martínez M.J., Martínez A.T., Bergbauer M., Szewzyk U. Transformation of Industrial Dyes by Manganese Peroxidases from *Bjerkandera Adusta* and *Pleurotus Eryngii* in a Manganese-independent Reaction. // *Appl. Environ. Microbiol.* 1998. V. 64. P. 2788–2793. doi: 10.1128/aem.64.8.2788-2793.1998
31. Huang X., Pan J., Liang B., Sun J., Zhao Y., Li, S. Isolation, characterization of a strain capable of degrading imazethapyr and its use in degradation of the herbicide in soil. // *Current Microbiology*. 2009. V. 59(4). P. 363–367. doi: 10.1007/s00284-009-9442-7
32. Huber P., Carre B. Decolorization of process waters in deinking mills and similar applications: a review. // *BioResources*. 2012. V. 7 (1). P. 1366–1382. doi: 10.15376/biores.7.1.1366-1382
33. Husain Q. Peroxidase mediated decolorization and remediation of wastewater containing industrial dyes: a review. // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2010. V. 9. P. 117-140. doi: 10.1007/s11157-009-9184-9
34. Ijoma G.N., Selvarajan R., Tekere M. The potential of fungal co-cultures as biological inducers for increased ligninolytic enzymes on agricultural residues. // *Int. J. Environ. Sci. Technol*. 2018. doi: 10.1007/s13762-018-1672-4
35. Ikehata K., Pickard M.A., Buchanan I.D., Smith D.W. Optimization of extracellular fungal peroxidase production by 2 *Coprinus* species. // *Can. J. Microbiol*. 2004. V. 50. P. 1033–1040. doi: 10.1139/w04-098
36. Kanwar S.S., Bansal N. Decolorization of industrial dyes by an extracellular peroxidase from *Bacillus* sp. F31. // *JAM*. 2014. V. 1. P. 252–265.
37. Karigar C.S., Rao S.S. Role of microbial enzymes in the bioremediation of pollutants: a review. // *Enzyme Research*. 2011. doi: 10.4061/2011/805187
38. Khalid A., Arshad M., Crowley D.E. Biodegradation potential of pure and mixed bacterial cultures for removal of 4-nitroaniline from textile dye wastewater. // *Water Research*. 2009. V. 43(4). P. 1110–1116. doi: 10.1016/j.watres.2008.11.045
39. Khatoon N., Jamal A., Ali M.I. Lignin peroxidase isoenzyme: a novel approach to biodegrade the toxic synthetic polymer waste. // *Environ Technol*. 2019. V. 40(11). P. 1366-1375. doi: 10.1080/09593330.2017.1422550
40. Khelil O., Choubane S., Cheba B.A. Co-production of cellulases and manganese peroxidases by *Bacillus* sp. R2 and *Bacillus cereus* 11778 on waste newspaper: application in dyes decolourization. // *Procedia Technol*. 2015. V. 19. P. 980–987. doi: 10.1016/j.protcy.2015.02.140
41. Khmelevtsova L.E., Sazykin I.S., Azhogina T.N., Sazykina M.A. Procaryotic Peroxidases and Their Application in Biotechnology (Review). // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2020. V. 56(4) P. 373-380. doi: 10.1134/S0003683820030059
42. Kirby N., McMullan G., Marchant R. Decolourisation of an artificial textile effluent by *Phanerochaete chrysosporium.* // *Biotechnology Letters*. 1995. V. 17(7). P. 761–764.
43. Krueger M.C., Harms H., Schlosser D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. // *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 2015. V. 99(21). P. 8857–8874. doi: 10.1007/s00253-015-6879-4
44. Kumar A., Singh A.K., Ahmad S., Chandra R. Optimization of laccase production by *Bacillus sp* strain AKRC01 in presence of agro-waste as effective substrate using response surface methodology. // *J Pure Appl. Microbiol*. 2020. V. 14(1). P. 1–12. doi: 10.22207/JPAM.14.1.36
45. Leu C., Singer H., Stamm C., Müller S.R., Schwarzenbach R.P. Variability of herbicide losses from 13 fields to surface water within a small catchment after a controlled herbicide application. // *Environmental Science & Technology.* 2004. V. 38(14). P. 3835-3841. doi: 10.1021/es0499593
46. Leung A., Shankar P.M., Mutharasann R. A review of fiber-optic biosensors. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. V. 125(2). P. 688-703. doi: 10.1016/j.snb.2007.03.010
47. Longoria A., Tinoco R., Vázquez-Duhalt R.. Chloroperoxidase-mediated transformation of highly halogenated monoaromatic compounds. // *Chemosphere*. 2008. V. 72(3). P. 485–490. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.03.006
48. Malik A. Metal bioremediation through growing cells. // *Environment International*. 2004. V. 30(2). P. 261–278. doi: 10.1016/j.envint.2003.08.001
49. McCauley L.A., Anger W.K., Keifer M., Langley R., Robson M.G., Rohlman D. Studying health outcomes in farmworker populations exposed to pesticides. // *Environmental Health Perspectives*. 2006. V. 114 (6). P. 953–960. doi: 10.1289/ehp.8526

50. Mercer D.K., Iqbal M., Miller P.G.G., McCarthy A.J. Screening actinomycetes for extracellular peroxidase activity. // *Appl. Environ. Microbiol*. 1996. V. 62. P. 2186–2190. doi: 10.1128/aem.62.6.2186-2190.1996
51. Mohammadi S., Kargari A., Sanaeepur H., Abbassian K., Najafi A., Mofarrah E. Phenol removal from industrial wastewaters: a short review. // *Desalination and Water Treatment*. 2005. V. 53 (8). P. 2215-2234. doi: 10.1080/19443994.2014.883327
52. Mousavi S.M., Hashemi S.A., Iman Moezzi S.M., Ravan N., Gholami A., Lai C.W., Chiang W.H., Omidifar N., Yousefi K., Behbudi G. Recent advances in enzymes for the bioremediation of pollutants. // *Biochemistry Research International*. 2021. 2021:5599204. doi: 10.1155/2021/5599204
53. Moussavi G., Haddad F.A. Bacterial peroxidase-mediated enhanced biodegradation and mineralization of bisphenol A in a batch bioreactor. // *Chemosphere*. 2019. V. 222. P. 549–555. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.190
54. Moussavi G., Shekoohiyan S., Naddafi K. The accelerated enzymatic biodegradation and COD removal of petroleum hydrocarbons in the SCR using active bacterial biomass capable of in-situ generating peroxidase and biosurfactants. // *Chem. Eng. J.* 2017. V. 308. P. 1081–1089. doi: 10.1016/j.cej.2016.09.136
55. Mui E.L., Cheung W.H., Valix M., McKay G. Dye adsorption onto activated carbons from tyre rubber waste using surface coverage analysis. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2010. V. 347(2). P. 290–300. doi: 10.1016/j.jcis.2010.03.061
56. Musengi A., Khan N., Le Roes-Hill M., Pletschke B.I. Increasing the scale of peroxidase production by *Streptomyces sp*. strain BSII#1. // *J. Appl. Microbiol*. 2014. V. 116. P. 554–562. doi: 10.1111/jam.12380
57. Nayanashree G., Thippeswamy B., Krishnappa M. Enzymatic studies on Natural rubber biodegradation by *Bacillus pumilus.* // *Int J Biological Res*. 2014. V. 2. P. 44–47. doi: 10.14419/ijbr.v2i2.2878
58. Nayanashree G., Thippeswamy B. Natural rubber degradation by laccase and manganese peroxidase enzymes of *Penicillium chrysogenum.* // *Int. J. Environ. Sci. Technol*. 2015. V. 12. P. 2665–2672. doi: 10.1007/s13762-014-0636-6
59. Ng T.W., Cai Q., Wong C.K., Chow A.T., Wong, P.K. Simultaneous chromate reduction and azo dye decolourization by *Brevibacterium casei*: Azo dye as electron donor for chromate reduction. // *Journal of Hazardous Materials.* 2010. V. 182(1–3). P. 792–800. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.106
60. Ong S.T., Keng P.S., Lee W.N., Ha S.T., Hung Y.T. Dye waste treatment. // *Water*. 2011. V. 3(1). P. 157–176. doi: 10.3390/w3010157
61. Pathak V.M. Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. // *Bioresources Bioprocessing*. 2017. V. 4. P. 15. doi: 10.1186/s40643-017-0145-9
62. Pizzul L., Castillo M.D.P., Stenström J. Degradation of glyphosate and other pesticides by ligninolytic enzymes. // *Biodegradation*. 2009. V. 20. P. 751-759. doi: 10.1007/s10532-009-9263-1
63. Pourakbar M., Moussavi G., Yaghmaeian K. Enhanced biodegradation of phenol in a novel cyclic activated sludge integrated with a rotating bed bioreactor in anoxic and peroxidase-mediated conditions. // *RSC Adv.* 2018. V. 8. P. 6293–6305. doi: 10.1039/c7ra12997a
64. Pradeep N.V., Anupama S., Navya K., Shalini H.N., Idris M., Hampannavar U.S. Biological removal of phenol from wastewaters: a mini review. // *Applied Water Science*. 2015. V. 5. P. 105-112. doi: 10.1007/s13201-014-0176-8
65. Rajkumar R., Yaakob Z., Takriff M.S., Kamarudin K.F. Optimization of medium composition for the production of peroxidase by *Bacillus* sp. // *Der Pharma Chemica*. 2013. V. 5. P. 167–174.
66. Rangasamy K., Athiappan M., Devarajan N., Samykannu G., Parray J.A., Aruljothi K.N., Shameem N., Alqarawi A.A., Hashem A., Abd Allah E.F. Pesticide degrading natural multidrug resistance bacterial flora. // *Microbial Pathogenesis*. 2018. V. 114. P. 304-310. doi: 10.1016/j.micpath.2017.12.013
67. Restrepo-Florez J.-M., Bassi A., Thompson M.R. Microbial degradation and deterioration of polyethylene – A review. // *Int. Biodeterior. Biodegrad*. 2014. V. 88. P. 83–90. doi: 10.1016/j.ibiod.2013.12.014
68. Rosatto S.S., Kubota L.T., de Oliveira Neto G. Biosensor for phenol based on the direct electron transfer blocking of peroxidase immobilising on silica–titanium. // *Analytica Chimica Acta*. 1999. V. 390(1-3). P. 65-72. doi: 10.1016/S0003-2670(99)00168-3
69. Ruiz-Duenas F.J., Morales M., García E., Miki Y., Martínez M.J., Martínez A.T. Substrate oxidation sites in versatile peroxidase and other basidiomycete peroxidases. // *Journal of*

Experimental Botany. 2009. V. 60(2). P. 441–452. doi: 10.1093/jxb/ern261

70. Ruzgas T., Csöregi E., Emnéus J., Gorton L., Marko-Varga G. Peroxidase-modified electrodes: fundamentals and application // Analytica Chimica Acta. 1996. V.330 (2-3). P. 123-138. doi:10.1016/0003-2670(96)00169-9
71. Sellami K., Couvert A., Nasrallah N., Maachi R., Abouseoud M., Amrane A. Peroxidase enzymes as green catalysts for bioremediation and biotechnological applications: A review. // *Sci. Total Env*. 2022. V. 806(2). 150500. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150500
72. Shekoohiya S., Moussavi G., Naddafi K. The peroxidase-mediated biodegradation of petroleum hydrocarbons in a H_2O_2-induced SBR using in-situ production of peroxidase: Biodegradation experiments and bacterial identification. // *J Hazard Mater.* 2016. V. 313 P. 170–178. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.03.081
73. Singh S., Kang S.H., Mulchandani A., Chen W. Bioremediation: environmental clean-up through pathway engineering. // *Current Opinion in Biotechnology*. 2008. V. 19(5). P. 437–444. doi: 10.1016/j.copbio.2008.07.012
74. Song J., Xu J., Zhao P., Lu L., Bao, J. A hydrogen peroxide biosensor based on direct electron transfer from hemoglobin to an electrode modified with Nafion and activated nanocarbon. // *Microchimica Acta.* 2011. V. 172(1). P. 117–123. doi: 10.1007/s00604-010-0470-6
75. Sowmya H.V., Ramalingappa M.K., Thippeswamy B. Biodegradation of polyethylene by *Bacillus cereus.* // *Adv. Polymer. Sci. Technol. Int. J*. 2014c. V. 4. P. 28–32.
76. Sowmya H.V., Ramalingappa M.K., Krishnappa M., Thippeswamy B. Degradation of polyethylene by *Trichoderma harzianum*-SEM, FTIR, and NMR analyses. // *Environ. Monit. Assess*. 2014b. V. 186. P. 6577–6586. doi: 10.1007/s10661-014-3875-6
77. Sowmya H.V., Ramalingappa M.K., Krishnappa M., Thippeswamy B. Low density polyethylene degrading fungi isolated from local dumpsite of shivamogga district. // *Int. J. Biol. Res*. 2014a. V. 2. P. 39–43.
78. Sridar R., Ramanane U.U., Rajasimman M. ZnO nanoparticles–Synthesis, characterization and its application for phenol removal from synthetic and pharmaceutical industry wastewater. // *Environmental Nanotechnology*, *Monitoring and Management*. 2018. V. 10. P. 388-393. doi: 10.1016/j.enmm.2018.09.003
79. Sun Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. // *Bioresource Technology*. 2002. V. 83(1). P. 1-11. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00212-7
80. Taboada-Puig R., Lu-Chau T.A., Eibes G., Feijoo G., Moreira M.T., Lema J., Taboada-Puig R., Lú-Chau T.A. Continuous removal of endocrine disruptors by versatile peroxidase using a two-stage system. // *Biotechnol. Proc*. 2015. V. 31. P. 908–916. doi: 10.1002/btpr.2116
81. Tien H.T., Salamon Z., Kutnik J., Krysinski P., Kotowski J., Ledermann D., Janas T. Bilayer Lipid Membranes (BLM): an experimental system for biomolecular electronic device development. // *Journal of Molecular Electronics.* 1988. V. 4 (4). P. S1–S30.
82. Tuncer M., Kuru, A., Isikli M., Sahin N., Çelenk F. Optimization of extracellular endoxylanase, endoglucanase, and peroxidase production by *Streptomyces sp*. F2621 isolated in Turkey. // *J. Appl. Microbiol*. 2004. V. 97. P. 783–791. doi: 10.1111/j.1365-2672.2004.02361.x
83. Tuncer M., Kuru A., Sahin N., Isikli M. Production and partial characterisation of extracellular peroxidase produced by *Streptomyces sp.* F6616 isolated in Turkey. // *Ann. Microbiol*. 2009. V. 59. P. 323–334. doi: 10.1007/BF03178335
84. Twala P.P., Mitema A., Baburam C., Feto N.A. Breakthroughs in the discovery and use of different peroxidase isoforms of microbial origin. // *AIMS Microbiology*. 2020. V. 6(3). P. 330. doi: 10.3934/microbiol.2020020
85. Ufarté L., Laville É., Duquesne S., Potocki-Veronese G. Metagenomics for the discovery of pollutant degrading enzymes. // *Biotechnology Advances*. 2015. V. 33(8). P. 1845–1854. doi: 10.1016/j.biotechadv.2015.10.009
86. Unuofin J.O., Okoh A.I., Nwodo U.U. Maize stover as a feedstock for enhanced laccase production by two gamma proteobacteria: a solution to agroindustrial waste stockpiling. // *Ind. Crop. Prod*. 2019. V. 129. P. 611–623. doi: 10.1016/j.indcrop.2018.12.043
87. Urek R.O., Pazarlioglu N.K. Enhanced production of manganese peroxidase by *Phanerochaete chrysosporium.* // *Braz. Arch. Biol. Technol*. 2007. V. 50. P. 913–920. doi: 10.1590/S1516-89132007000700001
88. Wang F.Q., Xie H., Chen W., Wang E.T., Du F.G., Song A.D. Biological pretreatment of corn stover with ligninolytic enzyme for high efficient enzymatic hydrolysis. // *Bioresour Technol*. 2013. V. 144. P. 572–578 doi: 10.1016/j.biortech.2013.07.012

89. Weber R., Gaus C., Tysklind M., Johnston P., Forter M., Hollert H., Heinisch E., Holoubek I., Lloyd-Smith M., Masunaga S., Moccarelli P. Dioxin- and POP-contaminated sites-contemporary and future relevance and challenges: overview on background, aims and scope of the series. // *Env. Sci. Pollution Research*. 2008. V. 15(5). P. 363–393. doi:10.1007/s11356-008-0024-1
90. Wei R., Zimmermann W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we? // *Microb Biotechnol*. 2017. V. 10. P. 1308–1322. doi: 10.1111/1751-7915.12710
91. Weng J.K., Li X., Bonawitz N.D., Chapple C. Emerging strategies of lignin engineering and degradation for cellulosic biofuel production. // *Current Opinion in Biotechnology*. 2008. V. 19(2). P. 166-172. doi: 10.1016/j.copbio.2008.02.014
92. Wilkes R.A., Aristilde L. Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas sp*.: capabilities and challenges. // *J. Appl. Microbiol.* 2017. V. 123. P. 582 – 593. doi: 10.1111/jam.13472