

Потенциал биологических агентов в обеззараживании почв при загрязнении токсичными химическими веществами

Д. В. Васендин^{1*}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: vasendindv@gmail.com

Аннотация. Пестициды широко используются для борьбы с сорняками, болезнями и вредителями культурных растений во всем мире, главным образом с середины двадцатого века. Пестициды очень широко используются для борьбы с вредителями во многих странах. Стойкий характер большинства синтетических пестицидов вызывает серьезные экологические проблемы. Обеззараживание этих опасных химических веществ очень важно. В данной обзорной работе рассматривается потенциал различных биологических агентов в обеззараживании сельскохозяйственных почв. Поля сельскохозяйственных культур загрязнены периодическим применением пестицидов. Биодegradация представляет собой экологичный, экономичный, высокоэффективный подход по сравнению с дорогостоящими и опасными для окружающей среды физическими и химическими методами. Биодegradация чувствительна к уровням концентрации перекиси водорода и азота, а также к изменениям микробного сообщества, температуры и кислотности. Экспериментальная работа для оптимальных условий в лабораторном масштабе может дать очень плодотворные результаты о конкретных штаммах бактерий и грибов. Данное исследование выявило преимущество биоремедиации над физико-химическими подходами. Дальнейшие исследования должны быть проведены для понимания механизмов биотрансформации.

Ключевые слова: биодegradация, токсичные химические вещества, почва

The potential of biological agents in soil disinfection when contaminated with toxic chemicals

D. V. Vasendin^{1*}

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: vasendindv@gmail.com

Abstract. Pesticides have been widely used to control weeds, diseases and pests of cultivated plants all over the world, mainly since the mid-twentieth century. Pesticides are very widely used for pest control in many countries. The persistent nature of most synthetic pesticides causes serious environmental problems. Decontamination of these dangerous chemicals is very important. This review paper examines the potential of various biological agents in the disinfection of agricultural soils. The fields of agricultural crops are polluted by the periodic use of pesticides. Biodegradation is an eco-friendly, economical, highly effective approach compared to expensive and environmentally hazardous physical and chemical methods. Biodegradation is sensitive to the concentration levels of hydrogen peroxide and nitrogen, as well as to changes in the microbial community, temperature and acidity. Experimental work for optimal conditions on a laboratory scale can give very fruitful results about specific strains of bacteria and fungi. This study revealed the advantage of bioremediation over physico-chemical approaches. Further research should be conducted to understand the mechanisms of biotransformation.

Keywords: biodegradation, toxic chemicals, soil

Введение

Пестицид может быть определен как любое вещество или смесь веществ, предназначенных для предотвращения, уничтожения, отпугивания или иного изменения поведения вредителя (насекомые, клещи, нематоды, сорняки, крысы и т.д.). Пестициды, такие как инсектициды, гербициды, фунгициды и различные другие вещества, используются для борьбы с вредителями. В современной практике сельского хозяйства широкое использование пестицидов очень часто используется для удовлетворения более высоких требований к урожайности. Ежегодно по всему миру применяются миллионы тонн пестицидов, что покрывает рынок в миллиарды долларов. Расходы на пестициды в 2020 году составили 35,8 млрд. долларов США, которые выросли до 39,4 млрд. долларов США в 2021 году. Наиболее широко в борьбе с вредителями используются гербициды. Одной из основных задач является минимизация вредного воздействия целевых организмов, включая вирусы, бактерии, грибы и насекомых. Широкое использование пестицидов вызывает серьезные экологические проблемы, так как только 5% или менее применяемых пестицидов достигают целевых организмов, что приводит к загрязнению почвы и водных объектов (основная экологическая проблема современности). Периодическое использование пестицидов делает ситуацию особенно тревожной. Это повторение в долгосрочной перспективе неизбежно приводит к накоплению пестицидов и их остатков в окружающей среде, ставя под угрозу все население своей многогранной токсичностью. Существует прямая связь между загрязнением пестицидами и их остаточным обнаружением [1]. Помимо токсического воздействия на человека, существует высокий риск загрязнения экосистемы. Существует устойчивая угроза диспергирования распыляемых пестицидов, которые обычно поражают (непосредственно) нетарифную растительность. Это приводит к загрязнению воздуха, почвы и растений. Существуют хронические угрозы жизни человека, вызванные длительным воздействием пестицидов в малых дозах, что может вызвать гормональные нарушения, снижение интеллекта и репродуктивные нарушения. Постоянная подвижность применяемых пестицидов через выщелачивание, сорбцию и проникновение в воздушную фазу приводит к загрязнению окружающей среды разного уровня [1].

Цель работы

Целью данной работы является рассмотрение традиционных и инновационных подходы к биологической деградации пестицидов, а также проанализировать (на основе литературных данных) различные факторы, влияющие на эти режимы биоремедиации.

Методы

Исследование проводилось с использованием методов анализа, синтеза, наблюдения, а также системного и комплексного подходов.

Результаты и обсуждение

Из применяющихся сегодня методов биodeградации наиболее важное значение принадлежит бактериальной деградации наряду с грибковой и фермента-

тивной деградацией. Деградация пестицидов приводит к образованию углекислого газа (CO_2) и воды (H_2O) окислением исходных соединений. Бактерия вовлекает в процесс деградации потребление энергии из этих продуктов деградации. Эффективность процесса зависит от оптимальных атмосферных условий, то есть температуры, кислотности почвы, влажности и ряда других факторов. Модификации различных образцов бактерий с помощью генетических мутаций также повышают эффективность применяемых микробов. Биоразлагаемое удаление пестицидов оказывает положительное влияние на плодородие сельскохозяйственных почв. Хлорпирифос оказывает значимое влияние на загрязнение почвы и водоемов. Микробная деградация весьма полезна для детоксикации таких (хлороорганических) пестицидов. Специфические гены и ферменты очень важны для расщепления специфических функциональных групп пестицида. Оптимизация условий окружающей среды и эффективное микробное сообщество на загрязненном участке важны для деградации пестицидов [1].

Существует жизненно важное преимущество использования микроорганизмов для деградации пестицидов. Это связано с разнообразием, широким распространением и адаптацией переменных метаболических путей. Кластеры генов участвуют в микробной деградации. Генетические манипуляции и конструирование генно-инженерных бактерий также используются для деградации пестицидов. Скрининг и выделение штаммов микроорганизмов очень эффективны для деградации карбендазима в минеральной питательной среде. Карбендазим является источником углерода для роста этого штамма. Диапазон рН 5,1–8,1 и температур 25–40 °С оптимальны для максимальной эффективности деградации, то есть до 90% в азотной атмосфере [2]. Пестицидразрушающие бактерии и покрытие *Rhizobium meliloti* на семенах *Medicago sativa* эффективны для восстановления почвы, загрязненной органическим фосфорным пестицидом. Этот подход эффективен, обладая рядом преимуществ, а именно быстрой скоростью восстановления почвы, простотой в эксплуатации и высокой обрабатываемой способностью для удаления органического фосфорного пестицида. *Sphingobium japonicum* – штамм для деградации хлорированных пестицидов, то есть гексахлорциклогексана. Этот штамм (*Sphingobium japonicum* LZ-2) может полностью разлагать линдан 20 мг/л за 10 часов [3]. Аэробная бактерия (штамм *Burkholderia seracida* CH-9) может быть использована для деградации имидаклоприда и метрибузина. 69%-ная деградация имидаклоприда и 86%-ная деградация метрибузина могут быть получены через 20 дней при начальной дозе 50 мг/л в минерально-солевой среде. Бифентрин (БФ) – синтетический пестицид. Он разлагается пиретроидными бактериями (*Acinetobacter calcoaceticus*). Скорость деградации может быть достигнута до 56,4% при начальной концентрации 100 мг/л с диапазоном рН 6,0–8,0 и 5% инокуляции [4].

Штаммы стрептомицетов имеют огромное применение для деградации пестицида хлорпирифоса (СР). Потенциал деградации этих штаммов можно оценить, проведя исследование в агаровой среде. Изменение рН может повлиять на эффективность процесса деградации. Трет-Бу меркаптан (ТМБ) подвергается биодеградации в воде в аэробных условиях. В процессе биодеградации участвует кинетика

первого порядка. Наблюдается незначительное увеличение скорости реакции при добавлении ТМБ и незначительное снижение при добавлении фенола. Бактериальные штаммы, способные разлагать метомил и карбофуран, могут быть изучены методом жидкостной хроматографии высокого давления (ВЭЖХ) в биодеградационном анализе. В качестве подвижных фаз использовали ацетонитрил и воду. Близость карбофуран-деградирующих штаммов к родам *Flavobacterium* и *Alcaligenes* и метомил-деградирующих штаммов к родам *Pseudomonas* и *Alcaligenes* была выявлена с помощью анализа последовательностей 16S рДНК [5]. Фотосинтетическая бактерия (GJ-22) способна разлагать циперметрин (СМР). Что деградация СМР GJ-22 очень продуктивна при 25-35 °С и рН 7,0. При проведении газовой хроматографии/масс-спектрометрии (ГХ-МС) выявляются продукты метаболизма. Деградация ХМР протекает окислительным или/ и гидролитическим путями под действием GJ-22 с образованием 5 метаболитов. Удаление хлорорганических пестицидов из почвы осуществляется микробиологическим путем в оптимальных условиях окружающей среды. Лучшие результаты получаются при добавлении гумата калия для повышения концентрации микроорганизмов [36]. Штамм *Pseudomonas putida* и *Pseudomonas mendocina* обладает большой способностью к биодеградации перметриновых и циперметриновых пестицидов. Биоремедиация до 90% может быть достигнута с помощью этих штаммов бактерий в течение 15 дней. *Acinetobacter* sp. TW и *Sphingomonas* sp. штаммы TY являются новыми и очень полезными для утилизации табачных отходов в диапазоне температур 25-37 °С и рН 7,0–8,0. Штамм актиномицета HP-S-01 выделен из активного ила для его применения для деградации дельтаметрина. Деградация приводит к образованию 3-феноксibenзальдегида в качестве основного продукта гидролиза. Этот штамм высокоэффективен в разложении бифентрина, фенвалерата и фенпропатрина. Этот процесс имеет кинетику первого порядка и является эффективным инструментом биоремедиации загрязнения окружающей среды пестицидами. Диазинон деградирующие бактерии используют его в качестве источника углерода и фосфора в различных условиях культивирования. Добавление источников углерода, таких как глюкоза или сукцинат, приводит к снижению скорости деградации [6]. Биодеградацию профенофоса проводят бактериальными штаммами, выделенными методом обогащения. Около 90% концентрации профенофоса может быть разрушено за 90 часов. Штамм *Parasoccus* sp. применяется для исследований биодеградации пиридина. Было замечено, что при концентрации пиридина <0,9 мг/л скорость деградации выше, а при концентрации >0,9 мг/л – ниже [7]. Бактериальный консорциум, который разлагает тетрахлорвинфос, выделен из сельскохозяйственной почвы. Он состоит из шести чистых штаммов. Исследование показало, что эти штаммы обладают потенциалом к деградации фосфорорганических пестицидов [8]. Молочнокислые бактерии могут разлагать фосфорорганические инсектициды путем ферментации. Молочнокислые бактерии используют ортофосфат в качестве источника углерода и фосфора. Эффективным и специфичным методом является бактериальная деградация пиретроида (пестицида). Высокоэффективный бактериальный штамм *Enterobacter aerogenes* способен разлагать многие другие пестициды - бифентрин, циперметрин и др. Штамм *Acinetobacter johnsonii* (MA-19) использовали для изучения деградации фосфорор-

ганических пестицидов методом обогащенной культуры. Для повышения эффективности были добавлены четыре дополнительных соединения, из которых сукцинат Na был очень эффективен; при увеличении его концентрации скорость деградации малатиона увеличивалась. Та же методика была применена и для деградации паранитрофенола бактериями *Rhodococcus*. Это эффективный бактериальный метод разложения паранитрофенола. Аналогично деградация фосфорорганических пестицидов осуществляется с использованием штаммов *Bacillus*, *Actinobacteria* и *L-протеобактерий* [9]. Бактерия *Bacillus thuringiensis* эффективна в разложении малатиона в минимальных солевых средах. С добавлением глюкозы и дрожжей рост бактерий увеличивается до 10^5 раз, что разрушает более 99% малатиона в течение 30 дней. Остатки изучали методом ВЭЖХ и ГХ-МС [10]. Эсбиотрин с большой эффективностью разлагался иммобилизованным ацинетобактером на магнитном полиуретане. С помощью иммобилизованных бактерий на шариках Са-альгинатного геля изучена деградация фосфорорганических инсектицидов наряду с продуктами гидролиза [10]. Цианобактерии и сине-зеленые водоросли превращают фенамифос в ряд его стабильных, нетоксичных компонентов с помощью культивируемой техники [11]. Аборигенные бактерии разлагают sumithion OPs путем анаэробного разложения. Они разлагают их на CH_4 , CO_2 , H_2S и др. Зерна зеленого кофе могут быть использованы для поддержки и роста бактерий (*Stenotrophomonas maltophilia*), которые разлагают ДДТ и эндосульфат. В качестве добавки используется среда, обогащенная глюкозой. Бактерия *Pseudomonas* может разлагать эндосульфат. Всякий раз, когда он биоаккумулируется у рыб (*Cyprinus carpio*), он использует эндосульфат в качестве источника углерода [12]. Атразин разлагается бактериями *Pseudomonas* путем двухфазной биodeградации (нестабильные продукты разложения с первой стадии далее разлагаются до вторичных компонентов). Эндосульфат метаболизируется в сульфат эндосульфата, который является единственным продуктом метаболизма эндосульфата, под действием бактерий. Это привело к 50%-ному разложению эндосульфата в течение трех дней. Грамотрицательный штамм бактерий (*Sphingomonas*) обладает высоким потенциалом деградации ДДТ. Микроскопические организмы (3 штамма бактерий) потенциально разлагают мефенацет и многие другие амидные пестициды, такие как пропанил и метолахлор, путем гидролиза.

Различные виды пестицидов (ОПС, хлорированные пестициды, гербициды и фунгициды) эффективно разлагаются процессом ферментации, осуществляемым *Rhodobacter sphaeroides*. Экранированные бактерии обладают высокой селективностью к деградации S-энантиомера метилаксила по сравнению с его R-энантиомерами с относительно высокой скоростью. Бактерии *Vibrio* и *Shewanella* могут эффективно разлагать метилпаратион. Механизм их биodeградации полностью отличается от фотокаталитического процесса. Фотосинтетические бактерии обладают способностью разлагать несколько типов пестицидов (хлорпирифос, фоксим и триазофос). Охробактрум легко окисляет триазофос в его кислую форму. Он обладает способностью разлагать этот пестицид до 95% в посевах. Хлорированные пестициды могут быть разложены с помощью комбинации аэробно-анаэробного разложения с применением раствора сахара. Это

один из очень эффективных методов биodeградации хлорированных пестицидов. Аллетрин является пиретроидным инсектицидом, и его деградация достигается *Acidomonas* sp. [13]. Восемь штаммов бактерий потенциально разлагают пестицид PCNP. Лучшие результаты были получены при коллективном использовании всех этих штаммов. Две бактерии *cad1* и *cad2* разлагают кадусафос в минерально-солевой среде с азотом (MSMN). Они также способны полностью разлагать этопрофос нематицид.

Иммобилизованные бактерии обладают способностью разлагать несколько пестицидов (гербициды, фунгициды и карбаматы) в различных условиях окружающей среды с различными скоростями потока. Штамм С-25 вызывал деградацию (почти 100%) 2,4-D хлорорганического пестицида при оптимальных условиях – температуре 30 °С и рН 7,0. Альдрин (хлорорганический инсектицид) анаэробно разлагается микроорганизмами. Эти микроорганизмы использовали экстрагированные дрожжи в качестве источника углерода. Этион (ОПс) анаэробно разлагается мезофильными бактериями. Другие виды также способны к ее деградации, такие как *Azospirillum* и *Pseudomonas*. Бактериальный консорциум, такой как *Bacillus* sp. и *Chryseobacterium joostei*, был использован для сравнения биodeградации линдана, метилпаратиона и карбофурана в индивидуальных и смешанных культурах, обогащенных пестицидами, с использованием биокинетических параметров. Эти бактерии используют пестициды в своих кометаболических путях. Психротрофная бактерия может разлагать Ме-паратион. Эта биodeградация чувствительна к колебаниям рН и температуры. Шесть родов способны разлагать хлорорганические пестициды, то есть эндосульфаны. Разные роды имеют разный потенциал их деградации, из-за чего *Micrococcus* и *Pseudomonas* были высокоактивны по сравнению с другими. Иммобилизованная *Escherichia coli* (хорошо известная бактерия) может разлагать хлорорганический инсектицид, содержащий сложноэфирную связь.

Одна и та же бактерия высокоэффективна в разложении ряда пестицидов, включая БХК, ДДТ, эндосульфан, изомеры ГХГ и 2,4-D. Бактериальный штамм DLL-1 биологически разлагает пестицид, присутствующий в почве и растительной системе. Штаммы стимулирующих рост ризобактерий (GPRB) эффективны в деградации фунгицидов и гербицидов по сравнению с азотобактериями и бациллами [14].

Заключение

Обеззараживание загрязненных территорий, вызванное применением пестицидов, является потребностью современного века. Применение обычных средств, то есть физико-химических методов, для разложения токсичных химических веществ не очень эффективно. Эти методы дороги и к тому же не благоприятны для экосистемы. Для деградации пестицидов и окончательной дезактивации загрязненных территорий биodeградация становится методом выбора. Для удаления опасных химических веществ из окружающей среды использование биологических агентов (бактерий, грибов и ферментов) очень эффективно, поскольку они экономичны и экологичны. Эти биологические агенты обладают по-

тенциалом разложения пестицидов на их менее токсичные побочные продукты. Существует необходимость дальнейших исследований для изучения механизмов участия микроорганизмов и их ферментов в процессе деградации [15]. Понимание ферментативных действий, особенно концепций, связанных с механизмом действия пестицидов, резистентностью, селективностью, толерантностью и экологической судьбой, оказывает жизненно важное влияние на знания в области науки о пестицидах и их биологического применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машков С. В., Белкина О. М., Васендин Д. В. Специальная обработка: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. – Новосибирск: Сибмедиздат НГМУ, 2011. – 114 с.
2. Tian L. S., Chen F. Biological characteristics and degradation performance of a degrading strain // *Yangzhou Daxue Xuebao*. – 2012. – Vol. 33, no. 1. – pp. 86–90.
3. Liu Z., C. Yang C., Qiao Ch.-L. Biodegradation of *p*-nitrophenol and 4-chlorophenol by *Stenotrophomonas* sp. // *FEMS Microbiology Letters*. – 2007. – Vol. 277, no. 2. – pp. 150–156.
4. Madhuban G., Debashis D., Das S. K. Biodegradation of imidacloprid and metribuzin by *Burkholderia cepacia* strain CH9 // *Pesticide Research Journal*. – 2011. – Vol. 23, no. 1. – pp. 36–40.
5. Kumar S., Anthonisamy A., Arunkumar S. Biodegradation of methyl parathion and endosulfan using: *Pseudomonas aeruginosa* and *Trichoderma* sp. // *Journal of Environmental Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 53, no. 1. – pp. 115–122.
6. Abo-Amer A. E. Biodegradation of diazinon by *Serratia marcescens* DI101 and its use in bioremediation of contaminated environment // *Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 21, no. 1. – pp. 71–80.
7. Qiao L., Wang J. Biodegradation characterization of a pyridine-degrading strain // *Qinghua Daxue Xuebao*. – 2010. – Vol. 50, no. 6, pp. 869–872.
8. Ortiz-Hernandez M., Sanchez-Salinas E. Biodegradation of the organophosphate pesticide tetrachlorvinphos by bacteria isolated from agricultural soil in Mexico // *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*. – 2010. – Vol. 26, no. 1, pp. 27–38.
9. A. Sabdono A., Radjasa O. K. Phylogenetic diversity of organophosphorous pesticide-degrading coral bacteria from Mid-West Coast of Indonesia // *Biotechnology*. – 2008. – Vol. 7, no. 4 – pp. 694–701.
10. Zeinat K., Nashwa A. H., Ibrahim M. Biodegradation and detoxification of malathion by of *Bacillus thuringiensis* MOS-5 // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. – 2008. – Vol. 2, no. 3. – pp. 724–732.
11. Cáceres T. P., Megharaj M., Naidu R. Biodegradation of the pesticide fenamiphos by ten different species of green algae and cyanobacteria // *Current Microbiology*. – 2008. – Vol. 57, no. 6. – pp. 643–648.
12. Prabakaran V., Peterson A. Effect of *Pseudomonas* on biodegradation of pesticide in the fish *Cyprinus carpio* // *Journal of Ecotoxicology and Environmental Monitoring*. – 2006. – Vol. 16, no. 5, pp. 459–464.
13. Painhankar M., Jain M., Deobagkar D. Biodegradation of allethrin, a pyrethroid insecticide, by an *Acidomonas* sp. // *Biotechnology Letters*. – 2005. – Vol. 27, no. 23–24. – pp. 1909–1913.
14. Sagar V., Singh D. P. Biodegradation of lindane pesticide by non white- rots soil fungus *Fusarium* sp. // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 27, no. 8. – pp. 1747–1754.
15. Изучение типовых патологических процессов в рамках преподавания медико-биологических дисциплин в вузе как составляющей знания о комплексной безопасности / Д.В. Васендин, В.И. Татаренко, О.П. Ляпина, Т.В. Ложкова, Г.А. Усенко // *Актуальные вопросы образования*. – 2019. – Т.2. – С. 111–115.

© Д. В. Васендин, 2022