УДК 547.541.3, 547.542.7 DOI: 10.69537/VKNIIRAN.2025.22.3.010

БИОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПЕСТИЦИДАМИ

© Мамедова Парвин Шамхал гызы(a), Бабаев Эльбей Расим оглу (a), Гахраманова Кенуль Рамиз гызы (a), Муштагова Фидан Галиб гызы (b)

(a) Институт Химии Присадок Министерства Науки и Образования Азербайджана
(b) Государственная Нефтяная Компания Азербайджанской Республики

Аннотация. Биоремедиация использует микроорганизмы для разложения органических загрязнителей в почве, грунтовых водах, иле и твердых веществах. Микроорганизмы разрушают загрязнители, используя их в качестве источника энергии или кометаболизируя их с источником энергии. Более конкретно, биоремедиация включает производство энергии в окислительно-восстановительной реакции внутри микробных клеток. Эти реакции включают дыхание и другие биологические функции, необходимые для поддержания и воспроизводства клеток. Для стимуляции и усиления микробной активности можно добавлять микроорганизмы (биоаугментация) или добавки (биостимуляция), такие как воздух, органические субстраты или другие доноры/акцепторы электронов, питательные вещества и другие соединения, которые влияют на обработку и могут ограничивать ее в их отсутствие. Биоремедиация может проводиться *in situ* или *ex situ*. Процессы *in situ* обрабатывают почву и грунтовые воды на месте, без вывоза или транспортировки за пределы участка. Этот подход может быть выгодным, поскольку затраты на обработку материалов и некоторые воздействия на окружающую среду могут быть снижены. Однако процессы *in situ* могут быть ограничены возможностью контролировать или манипулировать физической и химической средой во время биоремедиации. Процессы *ex situ*, с другой стороны, включают удаление загрязненной среды в зону обработки. В представленной работе нами рассмотрены основные пути биоремедиации почв, загрязненных пестицидами, а также показаны результаты собственных исследований авторов в области биоремедиации.

Ключевые слова: эфирные добавки, топлива, смазочные масла, присадки биоремедиация, пестициды, микроорганизмы, экология, полициклические ароматические углеводороды, биостимуляция

BIOREMEDIATION OF PESTICIDE-CONTAMINATED SOILS

© Mammedova Parvin Shamkhal (a), Babayev Elbey Rasim (a), Gahramanova Kenul Ramiz (a), Mushtagova Fidan Galib (b)

(a) Institute of Chemistry of Additives of Ministry of Science and Education of Azerbaijan
(b) State Oil Company of Azerbaijan Republic

Abstract. Bioremediation uses microorganisms to degrade organic contaminants in soil, groundwater, sludge, and solids. Microorganisms break down contaminants by using them as an energy source or by cometabolizing them with an energy source. More specifically, bioremediation involves energy production in oxidation-reduction reactions within microbial cells. These reactions include respiration and other biological functions necessary for cell maintenance and reproduction. Microorganisms (bioaugmentation) or additives (biostimulation) such as air, organic substrates or other electron donors/acceptors, nutrients, and other compounds that influence and may limit treatment in their absence can be added to stimulate and enhance microbial activity. Bioremediation can be performed in situ or ex situ. In situ processes treat soil and groundwater on-site, without off-site removal or transportation. This approach can be beneficial because material handling costs and some environmental impacts can be reduced. However, in situ processes may be limited by the ability to control or manipulate the physical and chemical environment during bioremediation. Ex situ processes, on the other hand, involve the removal of contaminated media to the treatment area. In this paper, we review the main pathways for bioremediation of pesticide-contaminated soils and present the results of the authors' own research in the field of bioremediation.

Key words: bioremediation, pesticides, microorganisms, ecology, polycyclic aromatic hydrocarbons, biostimulation.

С момента открытия некоторых синтетических органических пестицидов в 1940-х годах, таких как дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и гексахлорциклогексан (БХК), было произведено много высокоэффективных химических пестицидов, которые широко используются для борьбы с полевыми сорняками, патогенами растений и сельскохозяйственными вредителями [1]. Пестициды играют жизненно важную роль в защите урожайности сельскохозяйственных культур, но их чрезмерное и постоянное использование привело к серьезному загрязнению окружающей среды и рискам для здоровья человека. Поэтому устранение остаточных пестицидов из загрязненных почв привлекло исключительное внимание исследователей и общественности. Основываясь на многочисленных преимуществах, таких как низкая стоимость, высокая эффективность удаления и экологичность, микробная деградация стала основным метаболическим путем химических пестицидов в окружающей среде. Микроорганизмы, способные разлагать различные пестициды, были выделены и успешно идентифицированы из различных сред. Биоремедиация, обработка, которая использует живые организмы для преобразования опасных веществ в менее токсичные или нетоксичные соединения, является эффективным способом очистки почвы, загрязненной химическими пестицидами. В последние годы все больше исследований постепенно сосредотачиваются на выяснении микробных механизмов, участвующих в биодеградации и биоремедиации загрязнения химическими пестицидами.

Пестициды — это химические соединения, используемые для уничтожения вредителей; среди них гербициды — это соединения, особенно токсичные для сорняков, и это свойство используется для защиты урожая от нежелательных растений [2]. Пестициды используются для защиты и максимизации урожайности и качества урожая. Чрезмерное использование этих химикатов и их стойкость в окружающей среде породили серьезные

проблемы, а именно загрязнение почвы, воды и, в меньшей степени, воздуха, что оказывает вредное воздействие на экосистему и пищевую цепочку. Что касается загрязнения почвы, остаточная концентрация пестицидов часто превышает допустимые нормы. Там, где это происходит, задача состоит в том, чтобы уменьшить количество этих химикатов и получить сельскохозяйственные почвы, пригодные для выращивания экологически чистых культур. Микробный метаболизм местных микроорганизмов может быть использован для деградации, поскольку биоремедиация является экологически чистым, экономически эффективным и довольно рентабельным методом по сравнению с физическими и химическими методами. Существует несколько методов биодеградации, основанных на бактериальной, грибковой или ферментативной деградации. Эффективность удаления этих процессов зависит от типа загрязняющего вещества, а также от химических и физических условий почвы. Регулирование использования пестицидов строго связано с их воздействием на окружающую среду. В настоящее время каждая страна может принять правила, ограничивающие потребление пестицидов, запрещающие наиболее вредные из них и определяющие допустимые концентрации в почве. Однако эта изменчивость подразумевает, что каждая страна имеет разное восприятие токсикологии этих соединений, что приводит к разной рыночной стоимости выращиваемых культур.

Использование пестицидов для борьбы с вредителями в сельском хозяйстве и некоторых промышленных процессах во всем мире способствовало улучшению производства продуктов питания и товаров [3]. Однако их интенсивное использование привело к выбросу в окружающую среду широкого спектра ксенобиотических соединений, широко распространенных в воздухе, воде и почве. Существование загрязненных участков является важной экологической и медицинской проблемой сегодня. Для обработки загрязненных пестицидами почв было разработано несколько стратегий, включающих биологические, физико-химические и термические процессы, чтобы восстановить их, причем подходы биоремедиации являются одними из наиболее успешных, поскольку они экологически безопасны, экономичны и универсальны. Загрязнение почвы пестицидами в Мексике, как и во всем мире, является серьезной проблемой, поэтому различные исследовательские группы разработали биологические стратегии для оценки биодеградации пестицидов, а также схемы биоослабления, биостимуляции, биоаугментации и компостирования для обработки, восстановления и детоксикации загрязненных пестицидами участков. В этой работе авторы представляют информацию о процессах, связанных с биоремедиацией почв, загрязненных пестицидами, и подробно описывают состояние пестицидов в Мексике, а также усилия, предпринимаемые в области биодеградации пестицидов, и потенциал их применения для биоремедиации загрязненных почв.

В работе [4] изучалась биоремедиация пестицидов (карбофурана и параквата), загрязненных почв фермерского двора, с использованием компоста и азотного, фосфорного и калийного (NPK) удобрения. Микрокосмы, представляющие каждую обработку, были созданы в трех повторностях. Биостимуляция проводилась с использованием двух концентраций (0,5% и 1,0% по весу) удобрения NPK и компоста после внесения пестицидов в рекомендуемых нормах [карбофурана (1 г/кг) и параквата (5 мл/кг)] и в четыре раза больше рекомендуемых норм. Были созданы две контрольные почвы: абиотический контроль (стерильная почва фермерского двора + пестицид) и контроль (почва фермерского

двора без обработки). Мониторинг динамики численности микробного сообщества и остатков пестицидов в период биостимуляции проводился еженедельно в течение 28 дней с использованием стандартного метода подсчета и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) соответственно. В конце периода мониторинга было зафиксировано значительное снижение остатков пестицидов в различных вариантах обработки. В почвах, обработанных карбофураном, не было полных, но были значительные потери остаточного пестицида, однако в большинстве почв, обработанных паракватом, были полные потери в течение 21 дня. Более низкие остатки пестицидов были зафиксированы в вариантах с внесением компоста, чем NPK, как в почвах, обработанных карбофураном, так и в почвах, обработанных паракватом. После внесения пестицидов снижение количества микробов было зафиксировано на 7-й день во всех вариантах обработки, затем рост с 14-го по 21-й день, а затем снижение на 28-й день. Количество микробов было ниже в почвах, обработанных карбофураном, чем в почвах, обработанных паракватом, независимо от внесения питательных веществ (компост и NPK). Количество бактерий и грибов составляло 10^6 и 10^5 КОЕ/г почвы соответственно. Также, повышенные показатели были зарегистрированы для актиномицетов, нитрификаторов, фосфатных растворителей во всех обработках, и были в размере 10^3–10^4 КОЕ/г почвы. Почвенные микроорганизмы могли расщеплять и устранять большие концентрации карбофурана и параквата в почвах, измененных компостом, чем в почвах, измененных NPK. Это исследование предполагает, что биоремедиация почв, загрязненных пестицидами, может быть достигнута и улучшена путем стимулирования местного микробного сообщества необходимыми питательными веществами (компост).

Растущие проблемы загрязнения почвы вызывают обеспокоенность во всем мире. Большое количество загрязняющих веществ, таких как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), нефть и связанные с ней продукты, пестициды, хлорфенолы и тяжелые металлы, попадают в почву, представляя огромную угрозу для здоровья человека и природной экосистемы [5]. Химические и физические технологии рекультивации почвы либо некомпетентны, либо слишком дороги. Компостирование или добавление компоста может одновременно увеличивать содержание органических веществ в почве и плодородие почвы помимо биоремедиации, и, таким образом, считается одним из наиболее экономически эффективных методов рекультивации почвы. В этой статье рассматривается применение компостирования/компоста для биоремедиации почвы, а также дается критический взгляд на влияние этой технологии на микробные аспекты в загрязненных почвах. В этом обзоре также обсуждаются будущие потребности в исследованиях загрязненных почв.

Загрязнение почвы остаточными количествами пестицидов остается актуальной проблемой для человеческого сообщества [6]. Наиболее эффективным подходом к решению этой проблемы является прямая микробная деградация пестицида на сельскохозяйственных землях. Для этого используются отобранные микроорганизмы, которые быстро и полностью утилизируют пестициды. В настоящей работе использованы два гербицида, относящиеся к разным классам химических соединений: имазамокс и хлорсульфурон. Скрининг перспективных микроорганизмов проводился среди различных штаммов бактерий и грибов в жидкой минеральной среде, содержащей пестицид в качестве единственного источника углерода. Установлено, что наиболее активные микроорганизмы

способны утилизировать до 90% действующего вещества за короткое время. Динамика деградации пестицидов свидетельствует о том, что максимальная деструкция исследуемых веществ происходит в течение первых двух недель культивирования. В дальнейшем скорость деградации резко снижается или прекращается вовсе. Увеличение концентрации пестицидов в среде культивирования практически полностью подавляет их деградацию. Интересно, что бактерии оказались более приспособлены для деградации имазамокса, тогда как грибы способствовали разрушению хлорсульфурона.

Целью работы [7] является рассмотрение проблемы загрязнения почвы пестицидами и представление обзора существующих методов рекультивации этих типов почв. Во-первых, кратко обсуждается структура и сложность почвы, а также рассматривается влияние ее загрязнения пестицидами. Затем обсуждаются основные существующие и появляющиеся методы рекультивации почвы, в частности, для устранения пестицидов, и представляются их относительные преимущества и недостатки. Чтобы выбрать лучшую технологию рекультивации, необходимо учитывать характеристики почвы и участка, пригодность метода, затраты и воздействие на окружающую среду. Сравнение существующих технологий будет полезным инструментом для предварительного выбора наиболее перспективных методов для использования при решении конкретной проблемы дезактивации почвы.

Сообщается [8], что ученые выявили множество штаммов бактерий, способных разлагать остатки пестицидов, накопленных в окружающей среде. Из-за большого разнообразия химических свойств пестицидов один штамм может быть не универсальным. Следовательно, важно определить способность различных бактерий к биоремедиации. Этот обзор был сосредоточен на понимании и объяснении роли почвенных бактерий, обладающих способностью к детоксикации пестицидов. Были рассмотрены предыдущие исследовательские статьи, главы книг и литература о способности различных почвенных бактерий к биоремедиации, и были выявлены различные штаммы почвенных бактерий, обладающих способностью к биоремедиации, механизмы микробной биоремедиации, факторы, влияющие на биоремедиацию, и ограничения, а также недавние достижения в области биоремедиации. На основе выявленных пробелов в исследованиях были представлены дальнейшие перспективы. Результаты показали, что во всем мире выявлено множество почвенных бактерий, обладающих потенциалом биоремедиации. В качестве основного механизма биоремедиации микроорганизмы потребляют загрязненную пестицидами почву в качестве источников энергии или питательных веществ. Различные факторы, такие как биодоступность, субстрат и факторы окружающей среды, влияют на потенциал биоремедиации. Биостимуляция, биоаугментация, биопилинг, компостирование, биореакторы и земледелие определены как популярные методы биоремедиации, подходящие для биоремедиации загрязняющих веществ пестицидов. Однако эта технология все еще остается частично разработанной из-за отсутствия универсальных микроорганизмов для детоксикации различных пестицидов.

Около 4 миллионов тонн пестицидов ежегодно применяются к сельскохозяйственным культурам для борьбы с вредителями во всем мире [9]. По оценкам, менее 1% от общего числа применяемых пестицидов обычно достигает целевых вредителей, а большинство пестицидов остаются неиспользованными и попадают в экосистему. Конечным местом для избыточных пестицидов являются почва и вода.

Несмотря на их стойкость в окружающей среде, а также тенденцию остатков к биоаккумуляции и токсичности для нецелевых организмов, включая людей, использование химических пестицидов не может быть прекращено. Среди различных технологий рекультивации почв, доступных сегодня для дезактивации и детоксикации почв, загрязненных пестицидами, биоремедиация, по-видимому, является одним из наиболее экологически безопасных и экономически эффективных методов. Большинство пестицидов обычно попадают в основные классы хлорфеноксикислот, органохлоринов, органофосфатов, карбаматов и s-триазинов. В этой работе основное внимание уделяется микроорганизмам, способным разрушать пестициды, и факторам, влияющим на биодеградацию пестицидов в загрязненных почвах. Торы отмечают, что опасное загрязнение почв пестицидами часто возникает из-за неправильного хранения (устаревших) агрохимикатов, в результате чего пестициды разливаются в окрестностях места хранения, где они просачиваются в почву или разносятся ветром. В некоторых случаях разлив пестицидов продолжается в течение многих лет. Такой разлив может вызвать серьезное загрязнение почвы или грунтовых вод. Кроме того, высокотоксичные и стойкие соединения десятилетиями использовались в сельском хозяйстве для борьбы с вредителями и болезнями, которые, как доказано, наносят вред нецелевым видам. Хотя и заключены международные соглашения для регулирования производства и использования этих высокотоксичных и стойких соединений, они все равно будут оставаться в почвах еще несколько десятилетий. Более того, в некоторых странах международные соглашения еще не реализованы или не реализованы в полной мере, и поэтому токсичные пестициды все еще используются. Когда почва и грунтовые воды загрязнены, это может повлиять на урожай, скот и питьевую воду, а когда они потребляются людьми, могут возникнуть риски для здоровья населения.

После многих лет применения пестицидов, часто неизбирательного, был нанесен ущерб окружающей среде, а также агрономическим культурам, выращиваемым на загрязненных территориях [10]. При очистке воды используются методы, основанные на физических и/или физико-химических процессах, при этом образуются вторичные окислители, ответственные за минерализацию загрязняющих веществ, присутствующих в гербицидах, тем самым вызывая процесс деградации. Однако лишь немногие исследования продемонстрировали эффективность этих методов в почвах. Целью данного исследования был обзор существующих исследований, представляющих основные методы, используемые для рекультивации почв, загрязненных пестицидами. Особое внимание уделялось электрокинетике, передовым окислительным процессам, промывке почвы, химической или растворяющей экстракции и комбинациям этих методов. Согласно результатам нескольких исследований, сочетание таких методов, как электрокинетика и процессы промывки почвы, позволяет достичь высокой эффективности при их применении для деградации сельскохозяйственных загрязняющих веществ. Сочетание электролиза с другими методами, такими как реагент Фентона, ультразвуковое облучение и УФ-излучение, также дает удовлетворительные результаты в удалении пестицидов при обработке почвы. Однако технология Фентона, используемая отдельно, является наиболее перспективной из оцененных технологий, поскольку ее можно использовать для устранения нескольких загрязняющих веществ, особенно пестицидов, не нанося вреда окружающей среде и позволяя восстанавливать почву.

Хотя фармацевтические препараты (особенно антибиотики и нестероидные противовоспалительные препараты), пестициды, нефть и другие органические соединения приносят пользу человеку, их широкое и постоянное использование является серьезной проблемой, поскольку они загрязняют почвы и влияют на нецелевые организмы [11]. Поскольку вышеупомянутые соединения могут не разлагаться сразу после внесения в почву и поскольку их большие остатки обнаруживаются в этой среде, существует острая необходимость в рекультивации загрязненных почв. Для этой цели были разработаны различные технологии рекультивации; однако биоремедиация, которая включает биоаугментацию и/или биостимуляцию и является экономически эффективным и экологически чистым подходом, стала наиболее выгодным методом очистки загрязненных почв.

Управление устаревшими пестицидами и их уничтожение, а также рекультивация загрязненной пестицидами почвы являются важными глобальными проблемами, имеющими значение для сельского хозяйства, экологического здоровья и качества жизни. Использование и управление пестицидами имеют историю проблем из-за недостаточного знания надлежащего планирования, хранения и использования [12]. В этой работе рассматривается недавняя литература с акцентом на управление устаревшими пестицидами и рекультивацию загрязненной пестицидами почвы. Ризосфера растений является зоной активной рекультивации. Растения также поглощают загрязненную воду и удаляют пестициды из почвы. Положительные эффекты выращивания растений в загрязненной пестицидами почве включают трансформацию пестицидов как растительными, так и микробными ферментами. В этом обзоре рассматриваются последние достижения в рекультивации загрязненной пестицидами почвы с акцентом на простые процессы, которые могут широко применяться в любой стране.

Биоремедиация сегодня интенсивно изучается как метод обработки почвы, загрязненной хлорированными пестицидами, химикатами, причисленными к стойким органическим загрязнителям [13]. В представленной работе результаты исследования кинетики десорбции с использованием последовательной твердофазной экстракции (ТФЭ) Tenax TA были протестированы в качестве предикторов эффективности 3-недельной анаэробной биоремедиации почвы для хлорированных пестицидов γ-ГХГ, ДДТ и метоксихлора. В этих экспериментах использовались образцы, загрязненные в полевых условиях, а условия испытаний биоремедиации основывались на предыдущих исследованиях. Количество пестицидов, удаленных во время биоремедиации (43–98% от исходных концентраций), в большинстве случаев было намного больше (среднее отношение 1,37), чем быстро десорбирующиеся фракции, оцененные в ТФЭ с использованием двухкамерной модели кинетики десорбции. Разброс результатов также был значительным (стандартное отклонение 0,45). Однако наблюдалась статистически значимая корреляция между удаленными количествами и быстро десорбирующимися фракциями (R_2 = 0,64), что указывает на связь между разлагаемостью и десорбируемостью. Тем не менее, определение быстро десорбирующихся фракций считалось довольно плохим индикатором эффективности биоремедиации почвы для хлорированных пестицидов. Общее количество пестицидов, десорбированных Tenax за 72 ч, показало лучшие результаты в этом отношении (R_2 = 0,73, удаленная/десорбированная фракция = 1,10 ± 0,20, среднее значение ± стандартное отклонение). Исчезновение ДДТ во время биоремедиации

сопровождалось образованием ДДД, но оно было значительно ниже результатов, ожидаемых на основе стехиометрии.

Растущее использование различных пестицидов (например, органофосфатов, органохлоринов, карбаматов и пиретроидов) помогло повысить производительность сельского хозяйства за счет минимизации потенциальных потерь урожая, связанных с атаками насекомых [14]. Вследствие своей крайне стойкой природы большинство пестицидов и их остатков часто накапливаются в окружающей среде, оказывая пагубное воздействие на здоровье человека и различные экосистемы. Среди множества вариантов рекультивации биологические подходы привлекли широкое внимание к обработке пестицидов в почвенных/водных системах из-за их экологически безопасной природы. В этой связи эта обзорная статья была организована для того, чтобы осветить последние достижения в применении различных подходов к биоремедиации для деградации/удаления пестицидов из почвенных/водных матриц наряду с катаболической способностью микроорганизмов. Авторские обсуждения были расширены, чтобы подчеркнуть идентификацию конкретных бактериальных сообществ/штаммов, таких как *Bacillus sp*. и *Pseudomonas sp*. В этом обзоре будет представлен анализ современных биотехнологических методологий, а также связанных с ними преимуществ и препятствий для эффективного снижения воздействия пестицидов.

В работе [15] описывается, как воздействие пестицидов стало одним из наиболее важных компонентов современного сельского хозяйства. Пестициды оказывают большое влияние на экономику фермеров, поскольку они предотвращают и минимизируют сельскохозяйственные потери из-за вредителей (насекомых, грибков, нематод), повышают урожайность и качество продуктов питания с точки зрения поверхностной привлекательности. Однако эти синтетические пестициды имеют серьезные экологические проблемы и создают различные токсические эффекты для живых существ. В этом отношении подход биоремедиации может быть подходящей альтернативой традиционным методам обработки для обработки участков, загрязненных пестицидами. Биоремедиация - это использование микроорганизмов или их ферментов для разложения и детоксикации пестицида из окружающей среды. Микробные взаимодействия оказывают большое влияние на естественные биоремедиационные процессы, происходящие в почве. Микроорганизмы задействуют различные биохимические механизмы для разложения пестицидов, такие как реакции окисления и восстановления.

В работе [16] показано, что неконтролируемое и нерациональное использование пестицидов влияет на окружающую среду, сельское хозяйство и средства к существованию во всем мире. Чрезмерное применение пестицидов для лучшего производства сельскохозяйственных культур и поддержания достаточного производства продовольствия приводит к возникновению многих серьезных экологических проблем, таких как загрязнение почвы, загрязнение воды, а также влияет на пищевую цепочку. Эффективное управление использованием пестицидов и рекультивация загрязненной пестицидами почвы является одной из наиболее важных проблем, которые необходимо преодолеть. Эффективность современных методов биодеградации пестицидов с использованием различных микробов и ферментов зависит от различных физических и химических условий почвы, и они имеют определенные ограничения. Следовательно, новая стратегия является потребностью часа для защиты экосистемы от серьезной экологической опасности. В

последние годы применение наноматериалов привлекло внимание во многих областях из-за их уникальных свойств малого размера и увеличенной площади поверхности. Нанотехнология считается многообещающей и эффективной технологией в различных процессах биоремедиации и обеспечивает множество существенных преимуществ для улучшения экологических технологий с использованием наноматериалов с эффективными характеристиками. В настоящей статье рассматриваются и обсуждаются роль, применение и значение нанобиоремедиации пестицидов и токсичных загрязнителей с целью изучения потенциала наноматериалов в биоремедиации опасных соединений из окружающей среды.

Проведенный анализ научной литературы по тематике биоремидиации в странах Латинской Америки свидетельствует, что из-за чрезмерного и бесконтрольного использования пестицидов в сельском хозяйстве возникают негативные воздействия на окружающую среду, в основном на почву и воду, а также на здоровье человека [17]. Но благодаря таким процессам, как биоремедиация, в которых используется метаболический потенциал микроорганизмов, таких как бактерии и грибы, можно уменьшить воздействие пестицидов на окружающую среду и здоровье человека, что является одним из основных факторов для достижения устойчивого развития. В Колумбии существует серьезная проблема, связанная с загрязнением пестицидами, поскольку неконтролируемое использование пестицидов повлияло не только на окружающую среду, но и на здоровье человека. Таким образом, биоремедиация является хорошей альтернативой восстановлению загрязненной окружающей среды и уменьшению ее воздействия на здоровье человека.

Биоремедиация стала распространенным способом удаления остатков пестицидов из почвы и, таким образом, снижения их токсичности; методология, которая включает почвенные организмы, в основном микроорганизмы и растения, для содействия трансформации и деградации (или иммобилизации) загрязнителей окружающей среды [18]. Однако в последнее десятилетие почвенная фауна интегрируется в действия по биоремедиации для восстановления загрязненных почв и поддержания их качества в долгосрочном масштабе. В этой работе подчеркивается важность группы почвенных организмов, которые имеют большой потенциал в биоремедиации загрязненных почв, т. е. дождевых червей. Работа разделена на четыре раздела. Первые два раздела содержат обзор потребления пестицидов во всем мире и основные воздействия пестицидов на агроэкосистему. В третьем разделе будет рассмотрено, как дождевые черви могут снизить концентрацию и токсичность остатков пестицидов в почве. В заключительном разделе будут обобщены основные результаты биоремедиации загрязненных пестицидами почв с использованием дождевых червей и будут описаны новые направления захватывающих исследований на ближайшие годы.

Производство и использование пестицидов в Индии значительно возросло [19]. Отходы, образующиеся в пестицидной промышленности, стали экологической проблемой из-за нынешней недостаточной и неэффективной технологии переработки отходов, включающей физико-химическую и биологическую обработку. Имеющиеся данные указывают на то, что остатки пестицидов остаются на поверхности почвы, что приводит к токсичности в почвенно-водной среде. Недавние достижения в технологии биоремедиации с использованием микробного консорциума оказались эффективными для обработки пестицидов в почве. В настоящем исследовании была разработана установка для

поверхностной обработки почвы, в которой была проведена биоремедиация широко используемых пестицидов, а именно хлорпирифоса, циперметрина, фенвалерата и бутоксиэтилового эфира трихлорпира в различных концентрациях, а именно 25, 50 и 100 мг/кг, с использованием микробных консорциумов коровьего навоза в моделируемых условиях окружающей среды. Условия биоремедиации контролировались и поддерживались в ходе исследования. Исследование было продлено до тех пор, пока исходное соединение не было преобразовано в промежуточные и/или менее вредные соединения. Затем они будут далее минерализоваться, из части микробной пищевой цепи и/или интегрироваться в гуминовые фракции. Представленные здесь результаты подчеркивают потенциал консорциумов коровьего навоза для биоремедиации почвы, загрязненной пестицидами, в установке для поверхностной обработки почвы.

Загрязнение почв пестицидами представляет собой значительную экологическую и сельскохозяйственную проблему в глобальном масштабе, с ростом потребления пестицидов в различных регионах [20,21]. Компостирование стало экономически эффективным и устойчивым методом биоремедиации почв, загрязненных пестицидами. В этой обзорной статье рассматриваются механизмы, факторы, влияющие на эффективность, а также плюсы и минусы компостирования как стратегии решения проблемы загрязнения почв пестицидами. Пестициды попадают в почвенную среду как через точечные источники, такие как утечки из мест хранения или утилизации, так и через неточечные источники, включая интенсивное сельскохозяйственное использование и бытовое применение. Физические и химические характеристики пестицидов в сочетании с почвенными факторами, такими как проницаемость и размер частиц, влияют на их судьбу и поведение в почвах. Компостирование как метод биоремедиации дает несколько преимуществ, включая полное разрушение соединений пестицидов посредством микробной деградации, превращая их в менее опасные продукты. Ключевые факторы, влияющие на эффективность компостирования, включают доступность питательных веществ, размер частиц, температуру, pH, кислород и содержание влаги, все это имеет решающее значение для роста микроорганизмов и деградации пестицидов. В этой статье подчеркивается важность поддержания оптимальных условий для этих факторов, чтобы обеспечить высокую производительность и эффективность деградации пестицидов во время компостирования. В ней также обсуждаются потенциальные недостатки этого метода. Компостирование оказывается перспективным и экологически чистым подходом к восстановлению почв, загрязненных пестицидами, решая как экологические проблемы, так и потребность в устойчивых методах ведения сельского хозяйства.

ДДТ (дихлордифенилтрихлорэтан) использовался во всем мире как хлорорганический инсектицид для борьбы с сельскохозяйственными вредителями и переносчиками нескольких заболеваний человека, переносимых насекомыми [22]. Он был запрещен в большинстве промышленно развитых стран; однако из-за его стойкости в окружающей среде остатки ДДТ остаются в экологических отсеках, становясь долгосрочными источниками воздействия. Для идентификации и выбора видов грибов, подходящих для биоремедиации участков, загрязненных ДДТ, были собраны образцы почвы из загрязненных ДДТ сельскохозяйственных почв в Польше, и было выделено 38 таксонов грибов из 18 родов. Два из них, *Trichoderma hamatum* FBL 587 и *Rhizopus arrhizus* FBL 578, были протестированы на толерантность в присутствии концентрации ДДТ 1 мг/л

с использованием двух индексов, основанных на скорости роста грибов и продукции биомассы (индексы толерантности Rt:Rc и TI), что показало явную толерантность к ДДТ. Два выбранных штамма были изучены для оценки катаболической универсальности на 95 источниках углерода с ДДТ или без него с использованием системы Phenotype MicroArray и для исследования индуцированных реакций окислительного стресса. Два штамма смогли использовать большинство предоставленных субстратов, что привело как к высокой метаболической универсальности, так и к экологической функциональности в использовании источников углерода, несмотря на присутствие ДДТ. Была выдвинута гипотеза об активации специфических метаболических реакций с помощью антиоксидантных ферментов, зависящих от вида, для преодоления индуцированного химического стресса, поскольку присутствие ДДТ способствовало более высокому образованию активных форм кислорода в клетках грибов, чем в контрольных образцах. Испытуемые грибы представляют собой привлекательные потенциальные кандидаты для биоремедиации загрязненной ДДТ почвы и заслуживают дальнейших исследований.

Неизбирательное и чрезмерное использование пестицидов (таких как органофосфаты, карбаматы, органохлорины и хлорфеноксикислоты) привело к накоплению остатков пестицидов в почвенной среде [23]. Пестициды в основном воздействуют на нецелевые организмы и вызывают различные осложнения у почвенных микроорганизмов и их биологической активности, включая людей. Среди нескольких технологий рекультивации почв (ReTec), доступных сегодня для дезактивации и детоксикации почв, загрязненных пестицидами, биоремедиация является экологически безопасным, дружественным к окружающей среде и экономически эффективным методом. В настоящей работе дается оценка современных подходов в процессе биоремедиации почв, загрязненных пестицидами.

Целью работы [24] является представление критического обзора шламовых биореакторов (SB) и их применения для биоремедиации почв и осадков, загрязненных стойкими и токсичными соединениями. Обзор охватывает следующие темы: (i) основы процесса SB и анализ преимуществ и недостатков; (ii) новейшие применения SB для лабораторной и коммерческой биоремедиации почв с акцентом на пестициды, взрывчатые вещества, полициклические ароматические углеводороды и хлорированные органические загрязнители; (iii) тенденции использования поверхностно-активных веществ для улучшения доступности загрязнителей и добавления разлагаемых источников углерода для улучшения кометаболизма загрязнителей; (iv) последние результаты по использованию акцепторов электронов, отличных от кислорода; (v) биоаугментация и достижения в характеристике микробных сообществ SB; (vi) разработки в области анализов экотоксичности, направленных на оценку эффективности биоремедиации процесса. Из этого обзора можно сделать вывод, что SB является эффективной технологией *ad situ* и *ex situ*, которая может использоваться для биоремедиации проблемных участков, таких как те, которые характеризуются почвами с высоким содержанием глины и органических веществ, загрязняющими веществами, которые являются неподатливыми, токсичными и демонстрируют гистерезисное поведение, или когда биоремедиация должна быть выполнена в короткие сроки под давлением и контролем природоохранных агентств и регулирующих органов. Технология SB позволяет удобно манипулировать и контролировать несколько параметров окружающей среды, что может привести к

улучшенной и более быстрой очистке загрязненных почв: питательные вещества N, P и источник органического углерода (биостимуляция), инокуляция (биоаугментация), повышенная доступность загрязняющих веществ за счет использования поверхностно-активных веществ или индуцирования производства биосурфактантов внутри SB и т. д. Интересной новой областью является использование SB с одновременными акцепторами электронов, что продемонстрировало свою полезность для биоремедиации почв, загрязненных углеводородами и некоторыми органохлорированными соединениями. Исследования по характеристике микробных сообществ SB все еще находятся на ранних стадиях, несмотря на их значимость для улучшения работы реактора и оптимизации конструкции.

Отмечается [25], что с ростом населения во всем мире потребность во всех продуктах питания, особенно растительного происхождения, росла с каждым днем, и это привело к интенсивному использованию пестицидов в современном сельском хозяйстве. По всем этим причинам этот рост использования пестицидов достиг уровней, которые будут оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. В то время как принимающие среды, такие как воздух, почва и вода, загрязняются, пестициды накапливаются в результате их жизнедеятельности и воздействия пищевой цепи в живых существах этих сред. Эти пестициды, которые накапливаются в живых существах, со временем становятся опасными для живых элементов экосистемы, поскольку они достигают концентраций, которые будут создавать токсические эффекты. В связи с этой ситуацией, если не будут приняты необходимые меры предосторожности, серьезные экологические кризисы во многих экосистемах станут неизбежными. Сегодня использование некоторых пестицидов запрещено, а использование других ограничено. Однако этого недостаточно, и необходимо срочно определить и внедрить необходимые планы действий. Сегодня многие физические и химические процессы уже используются для удаления пестицидов. Однако такие методы имеют много недостатков из-за их высокой стоимости и возможности создания вторичных загрязнителей в окружающей среде. Биологические процессы, особенно исследования по улучшению, проводимые с использованием микроорганизмов, имеют много преимуществ с точки зрения как стоимости, так и экологичности. Учитывая негативное воздействие пестицидов на окружающую среду, очень важно улучшать среды, загрязненные этими загрязнителями, с помощью соответствующих и эффективных методов. Целью данного исследования было составление последних научных исследований по микробной биоремедиации пестицидов.

Сообщается [26], что Индия — страна, основанная на сельском хозяйстве, где 70% населения выживает за счет него. Для увеличения производства полей используются различные пестициды. Хлорпирифос (O,O-диэтил O-3,5,6-трихлор-2-пиридилфосфоротиоат) — это органофосфатный пестицид, который широко используется в качестве инсектицида для защиты растений. Но из-за своей стойкой природы в окружающей среде он приводит к различным опасностям, включая нейротоксические эффекты, сердечно-сосудистые заболевания и респираторные заболевания. Биоремедиация — это технология эффективного устранения хлорпирифоса из окружающей среды. При биоремедиации хлорпирифоса потенциальные деградирующие микроорганизмы обладают геном opd (деградация органофосфата), который гидролизует хлорпирифос и использует его в качестве единственного источника углерода. Таким образом, в настоящем обзоре

обсуждается, как с помощью биоремедиации пестицид хлорпирифос можно разложить с использованием потенциальных почвенных микроорганизмов.

Пестициды являются компонентом современного сельского хозяйства, который помогает получать здоровый урожай. Управление пестицидами, уничтожение неиспользованных пестицидов и детоксикация загрязненной почвы и воды были среди основных глобальных проблем, касающихся сельского хозяйства, экологического благополучия и качества жизни, поскольку они сохраняются в окружающей среде и биоусиливаются по всей пищевой цепи [27]. Обычно биоремедиация включает полное удаление пестицидов естественными или генетически модифицированными микроорганизмами и растениями. Процесс более конструктивен и экологичен по сравнению с традиционными, физическими и химическими методами. Биоремедиация приводит к полному или частичному преобразованию загрязняющих веществ в микробную биомассу и устойчивые нетоксичные конечные продукты. В этой главе обсуждаются различные подходы к биоремедиации пестицидов и факторы, которые влияют на процесс биоремедиации. Различные включенные методы включают биоаугментацию, биобарботаж, биостимуляцию, биоремедиацию, биоаккумуляцию, обработку почвы, биореакторы и фиторемедиацию.

С началом промышленной революции производство различных пестицидов, несомненно, повысило урожайность сельскохозяйственной продукции, а также защитило большинство наших культур от вредителей. Поскольку мы не можем потерять большую часть урожая из-за этих вредителей. Пестициды в настоящее время играют важную роль в повышении урожайности и обеспечивают экономическую выгоду для фермеров, но использование пестицидов на сельскохозяйственных полях является сегодня серьезной проблемой [28]. Рост загрязнения почвы вызвал серьезную озабоченность. Большое количество загрязняющих веществ, среди которых пестициды являются одним из основных опасений, представляют серьезную угрозу здоровью человека, а также природной экосистеме. Доступные методы (физические или химические) либо неполны, либо дорогостоящи. Биоремедиация предоставляет новый инструмент или такой процесс. Биоремедиация предоставляет экологически чистый, экономичный и эффективный метод детоксикации пестицидов.

Биодеградация загрязняющих СОЗ в почве была проведена в работе [29]. Процесс включает обработку почвы, которая содержит анаэробные и аэробные микробы, способные преобразовывать линдан и ДДТ в безвредный материал, и находящейся под анаэробными и аэробными этапами. Значительная биодеградация загрязняющих СОЗ произошла в этих испытаниях. Но некоторые токсичные органические соединения остались.

Быстрые темпы роста численности населения привели к росту производства сельскохозяйственных культур, в связи с чем во всем мире было зафиксировано значительное увеличение применения пестицидов. После улучшения использования пестицидов увеличилась степень загрязнения окружающей среды, особенно загрязнения почвы. Для решения этой проблемы были предложены различные методы контроля и устранения таких загрязнителей. Сообщалось о различных методах уничтожения или снижения степени загрязнения пестицидами почвы. Несколько факторов имеют решающее значение для загрязнения почвы, включая pH, температуру, количество и тип/природу почвенных микроорганизмов. Среди доступных методов некоторые из них лучше

реагируют на удаление загрязнения. Одним из таких методов является биоремедиация, и это одно из идеальных решений для снижения загрязнения. В этой инновационной технологии микроорганизмы используются для разложения загрязнителей окружающей среды или для сдерживания загрязнения. В этой статье дается подробное представление о различных стратегиях, используемых для снижения и удаления загрязнения почвы [30].

Авторы работы [31] сообщают, что широкое применение пестицидов в сельском хозяйстве изначально повысило урожайность и производство. Со времени сельскохозяйственной революции пестициды значительно помогли фермерам в достижении этой цели. Пестициды, предназначенные для коммерческого использования, представляют собой смеси с одним, заявленным и регулируемым ингредиентом. Пестициды могут транспортироваться с мест их применения в близлежащие ручьи и реки посредством транспортных процессов. Водные популяции, в том числе рыбы, донные беспозвоночные и другие, могут пострадать, если пестициды распространены в реках и ручьях. Биоремедиация крайне необходима из-за уровня токсичности, вызываемой пестицидами. Растения, которые поглощают и преобразуют пестициды, используются в тандеме с эндофитами, которые могут разрушать пестициды. Технологии фиторемедиации идеально подходят для использования на почвах, содержащих пестициды. Растения для фиторемедиации можно выращивать и использовать с пользой. Выгодно добавлять в почву добавки, которые способствуют биологическому разнообразию микробных сообществ и источникам пищи. Почвы, загрязненные пестицидами, имеют большие шансы на восстановление посредством биоремедиации. Недавние исследования продвинули наши фундаментальные знания о том, как пестициды разлагаются при низких концентрациях в различных условиях окружающей среды, и они, вероятно, помогут в создании практических методов биоремедиации для почвенных и водных ресурсов, загрязненных пестицидами.

Проблемы биоремедиации почв стала центром внимания исследователей также и в монографиях [32,33].

Целью исследования [34] было изучение влияния консорциумов трех типов местных бактерий (*Corynebacterium sp., Sphingobacterium gobiense* и *Kocuria flava*) и дождевых червей (при 5 и 10 дождевых червей/кг почвы) и их комбинации на процент удаления хлорпирифоса из загрязненной хлорпирифосом почвы в Судане. Образцы иловой почвы (почва Герфа) смешивали с известной концентрацией хлорпирифоса (450 мг/кг) и инкубировали в течение различных периодов воздействия (3, 7, 15 и 45 дней) только с бактериальными консорциумами, низкой и высокой плотностью дождевых червей и их комбинациями в лабораторных условиях. Оставшиеся остатки хлорпирифоса измеряли с помощью газового хроматографа, оснащенного пламенно-ионизационным детектором. Было обнаружено, что скорости деградации и периоды полураспада следуют двухфазной модели с начальной быстрой скоростью исчезновения, за которой следует вторая фаза медленного исчезновения. Все обработки вызвали значительный ($P<0,05$) эффект на скорость деградации хлорпирифоса по сравнению с контролем. Бактериальные консорциумы в одиночку вызвали самый высокий эффект (73,83%) на процент удаления хлорпирифоса, за которыми следовали бактериальные консорциумы плюс высокая плотность дождевых червей (71,22%). Дождевые черви в одиночку вызвали наименьший эффект на скорость деградации хлорпирифоса (64,27 и 66,49% для высокой и низкой

концентраций соответственно). На основании этого вывода местные бактериальные консорциумы представляют собой многообещающий биоремедиационный агент для очистки почвы, загрязненной хлорпирифосом, и поэтому могут заслуживать дальнейшего изучения в различных экспериментальных условиях, а также проверки результатов в условиях реальной загрязненной почвы.

Таким образом, биоремедиация определяется как использование биологических процессов для разложения, разрушения, преобразования и/или существенного удаления загрязняющих веществ или ухудшения качества из почвы и воды. Биоремедиация — это естественный процесс, который основан на бактериях, грибах и растениях для изменения загрязняющих веществ, поскольку эти организмы выполняют свои обычные жизненные функции. Метаболические процессы этих организмов способны использовать химические загрязняющие вещества в качестве источника энергии, делая загрязняющие вещества безвредными или менее токсичными продуктами в большинстве случаев. В этой статье суммируются общие процессы биоремедиации в почвенной среде, уделяя особое внимание биодеградации нефтяных углеводородов. Рассматривается влияние почвенных условий на скорость биодеградации углеводородов. Кроме того, объясняются и рассматриваются ограничения и потенциал как ex situ, так и in situ биоремедиации в качестве жизнеспособных альтернатив традиционной рекультивации [35].

Агрохимикаты, такие как пестициды, способствовали значительному повышению урожайности; однако они также могут быть связаны с неблагоприятным воздействием на здоровье человека и почвенные микроорганизмы [36]. Для эффективной биоремедиации пестицидов, накопленных на сельскохозяйственных полях, необходима стимуляция микроорганизмов. В этом исследовании мы изучили взаимосвязи между бактериальной биомассой и общим углеродом (TC) и общим азотом (TN) в 427 сельскохозяйственных почвах. Бактериальная биомасса почвы в целом положительно коррелировала с содержанием TC и TN в почве, но некоторые почвы имели низкую бактериальную биомассу, несмотря на содержание большого количества TC и TN. Были исследованы почвы двух полей (поля A и B) с низкой бактериальной биомассой, но высоким содержанием TC и TN. Длительное использование пестицидов (дихлорпропан-дихлорпропен и фостиазат на поле A и хлорпикрин на поле B), по-видимому, способствовало низкой бактериальной биомассе, наблюдаемой в этих почвах. Почва с поля A была обработана различными органическими материалами и инкубирована в течение 1 месяца в лабораторных условиях. Бактериальная биомасса в почве поля A была увеличена при обработке органическими материалами, богатыми TN. Применение органических материалов стимулировало рост микроорганизмов с потенциалом биоремедиации почв, загрязненных пестицидами.

Внедрение методов молекулярного скрининга, не зависящих от культуры, особенно основанных на последовательностях генов 16S рРНК, позволило микробиологам изучить аспект микробного разнообразия, не обязательно отраженный в результатах исследований культивирования [37]. Структура бактериального сообщества была изучена для загрязненного пестицидами участка, который впоследствии был восстановлен с использованием эффективного деградирующего штамма *Arthrobacter protophormiae* RKJ100. Эффективность процесса биоремедиации была оценена путем мониторинга истощения загрязняющего вещества, а влияние добавления экзогенного штамма на

существующую структуру почвенного сообщества было определено с помощью молекулярных методов. Генный пул 16S рРНК, амплифицированный из метагенома почвы, был клонирован, а исследования полиморфизма длины рестрикционных фрагментов выявили 46 различных филотипов на основе схожих паттернов полос. Секвенирование репрезентативных клонов каждого филотипа показало, что структура сообщества загрязненной пестицидами почвы в основном состояла из протеобактерий и актиномицетов. Анализ полиморфизма длины терминального рестрикционного фрагмента показал лишь незначительные изменения в структуре сообщества в процессе биоремедиации. Иммобилизованные клетки штамма RKJ100 усилили деградацию загрязняющих веществ, но, по-видимому, не оказали заметного влияния на существующую структуру бактериального сообщества.

Зеленая революция является одной из основных потребностей для спасения нашей планеты и нашей страны от жгучих экологических проблем, произошел квантовый скачок в использовании синтетических пестицидов, которые играют важную роль в сельском хозяйстве для борьбы с вредителями, такими как насекомые, сорняки, патогенные организмы, вызывающие болезни растений, нематоды, членистоногие и позвоночные, которые представляют опасность для качества пищевых продуктов, таких как фрукты и овощи, опасны для окружающей среды, влияют на плодородие почвы и вызывают дисбаланс в природе [38]. В настоящее время существуют некоторые физико-химические и биологические методы, которые используются для снижения количества пестицидов. Однако эти методы неэффективны, нерентабельны и требуют много времени. В то время как биоремедиация является новым инструментом или экологически чистым подходом, используемым для очистки загрязненных сред с использованием различных видов микроорганизмов, таких как бактерии, грибы, актиномицеты и некоторые зеленые растения. Биоремедиация является менее инвазивным методом, экологически чистым, экономичным, более эффективным и восстанавливающим функцию почвы. Большинство пестицидов обычно попадают в основные классы органохлоринов, хлорфиноксикислот, карбаматов, органофосфорных. Текущее исследование было сосредоточено на понимании механизмов биоремедиации, участия различных микробов и их жизненно важной роли в удалении пестицидов различных категорий.

Биоремедиация загрязненных пестицидами почв также стала объектом пристальных исследований в работах [39-41].

Таким образом, можно сделать вывод, что поля, загрязненные пестицидами, можно найти по всему миру из-за чрезмерного использования инсектицидов, гербицидов и фунгицидов. Многие из пестицидов, которые когда-то использовались интенсивно, теперь запрещены и, как было показано, оказывают вредное воздействие на здоровье. Растения, бактерии и грибы, как было показано, обладают способностью разлагать пестициды, которые могут быть использованы для успешного восстановления загрязненных полей и воды [42]. В этой статье сначала будет представлен обзор различных типов пестицидов, их применения и их основных характеристик, а затем будет проведен анализ их поведения в окружающей среде. Пестициды, которые вносятся в окружающую среду, редко остаются там, где они были применены. Часто имеет место сложная система транспортировки, переноса и трансформации пестицидов в различных экологических отсеках. Все эти процессы влияют на возможную рекультивацию среды, загрязненной пестицидами.

Биоремедиация — это первая технология, которая рассматривается. При биоремедиации основное внимание уделяется рекультивации пестицидов микроорганизмами в основной массе почвы без помощи или присутствия растений. Во-вторых, обсуждается рекультивация, связанная с растениями. При фокусировании на рекультивации, связанной с растениями, необходимо проводить различие между ризоремедиацией в ризосфере и фиторемедиацией в тканях растений. Хотя процессы ризоремедиации и фиторемедиации возможны исключительно с использованием растений, многие из этих процессов оптимизируются ассоциациями между растениями и микроорганизмами. Растения и бактерии или грибы часто живут в симбиотических отношениях, которые помогают им выживать в загрязненных средах, а также с деградацией загрязняющих веществ, с которыми они сталкиваются.

Фиторемедиация с использованием поверхностно-активных веществ — это экологически чистая обработка для снижения загрязнения почвы [43]. Циперметрин (CYP) — один из наиболее широко используемых пиретроидных инсектицидов против различных вредителей, и его использование вызывает загрязнение почвы. Целью данного исследования было изучение удаления CYP из загрязненной почвы с помощью *Plantago major (PM)* и некоторых поверхностно-активных веществ. Впервые авторы задокументировали поглощение и перемещение CYP из почвы и использовали некоторые стратегии для повышения эффективности этой технологии, которая включала использование различных поверхностно-активных веществ для растворения загрязняющего вещества. В эксперименте в горшке четыре поверхностно-активных вещества [жидкий диоксид кремния (SiO_2, 750 мг/л), 2-гидроксипропил-бета-циклодекстрин (HPßCD, 1%), гуминовая кислота (HA, 10 мг/л) и твин 80 (Tw80, 9,2 мг /л)] использовались для облегчения фиторемедиации почвы, загрязненной PM (10 мкг/г). Полученные данные показали, что внесение в почву PM плюс SiO2 значительно снизило количество CYP в почве и значительно увеличило концентрацию CYP в корнях и листьях растений. Самое большое значение периода полураспада ($t_{1/2}$) CYP было в стерилизованной почве (24,8 дня), а самое короткое — в почве с PM, измененной SiO_2 (6,41 дня). Значение периода полураспада ($t_{1/2}$) CYP в почве с одними PM составило 10,0 дней. В ходе экспериментов *in vitro* метод периодического равновесия показал, что гидроксипропил-ß-циклодекстрин (HPßCD) является лучшим поверхностно-активным веществом для наиболее эффективного устранения CYP из почвы. Однако в тепличном эксперименте добавление SiO_2 в почву, обработанную PM, было более эффективным, чем использование других поверхностно-активных веществ, повышающих растворимость, в удалении значительных количеств CYP ($p>0,05$) из загрязненной почвы. Таким образом, интеграция SiO_2 + PM является лучшим методом обработки и рекомендуется для минимизации содержания загрязняющих веществ для растений в загрязненной CYP почве.

Естественное восстановление загрязнения окружающей среды – естественное затухание – процесс долгосрочный. Разработка технологии биоремедиации загрязненных почв – многоэтапный процесс, требующий комплексного применения нескольких методов: стимуляции аборигенной микрофлоры на загрязненном участке и внесения в почву микроорганизмов-деструкторов [44]. В последнее время на завершающих этапах рекультивации почв активно применяется метод фиторемедиации. Для оценки эффективности биоремедиации почв, загрязненных пестицидами, используют стимуляцию

анаэробной или факультативно-анаэробной микрофлоры и последующую фиторемедиацию. Почва была отобрана вблизи бывшего разрушенного хранилища СОЗ. Остатки пестицидов в почве были оценены методом мультиостаточного анализа ГХ/МС, и выявлено комплексное загрязнение ДДТ и трифлуралином. С целью рекультивации данного комплексного загрязнения загрязненную почву обрабатывали в комбинированных аэробных и анаэробных условиях в течение 3,5 месяцев, затем использовали метод фиторемедиации. В результате биоремедиации в анаэробных/аэробных условиях содержание трифлуралина во всех вариантах опыта снизилось до 4-6% от исходного. Фиторемедиация не оказала существенного влияния на разложение трифлуралина – всего 2-3%. До фиторемедиации ДДТ разлагался на 27,5-29,0%. После фиторемедиации деградация пестицида составила 56,3-72,5%. Проведенное исследование показало, что в случае комплексного загрязнения фиторемедиация как метод дополнительной рекультивации имела важное значение для разложения ДДТ и ДДЕ и не имела существенного значения для минерализации ДДД и трифлуралина.

Устойчивость эндосульфана и промежуточного метаболита сульфата эндосульфана в окружающей среде и их токсическое воздействие на биоту требуют их удаления [45]. В этом исследовании изучалась биоаугментация почвы, загрязненной эндосульфаном, грибковым инокулянтом *Aspergillus niger ARIFCC 1053*. Влияние биоаугментации *A. niger* на почву, загрязненную эндосульфаном, оценивалось с помощью изменения pH и высвобождаемого хлорида, а также с помощью тонкослойной хроматографии и газовой хроматографии. Его воздействие на функциональность почвы контролировалось путем оценки активности ферментов дегидрогеназы и арилсульфатазы. Деградация эндосульфана достигла неопределяемого уровня на 15-й день. pH среды был почти нейтральным (6,9) во время инокуляции и снизился до 3,6 на 15-й день. Количество хлорида, выделяемого в определенные интервалы при деградации эндосульфана, варьировалось от 28 мкг/мл до 104 мкг/мл. . Изменение pH и увеличение выделяемого хлорида коррелировали с метаболической активностью, участвующей в одновременной деградации эндосульфана. Сульфат эндосульфана, промежуточный метаболит, был обнаружен и исчез на 11-й день процесса. Увеличение активности ферментов является показателем плодородия почвы и предполагает возможное участие этих ферментов в деградации эндосульфана. Эти результаты показывают, что биоаугментация с помощью *A. niger* может быть жизнеспособным инструментом для восстановления почвы, загрязненной эндосульфаном.

С быстрым развитием индустриализации и интенсификации сельского хозяйства проблема загрязнения сельскохозяйственных угодий привлекла значительное внимание [46]. В этой статье рассматриваются источники и опасности загрязнения сельскохозяйственных угодий, а также типы, принципы и технические преимущества биоремедиации. Кроме того, в ней дается краткий прогноз будущих усилий по восстановлению сельскохозяйственных угодий. Исследования показывают, что основными источниками загрязнения сельскохозяйственных угодий в настоящее время являются четыре фактора: природная среда, атмосферные отложения, поливная вода и сельскохозяйственное производство. Существует два основных метода рекультивации загрязнения сельскохозяйственных угодий: фиторемедиация и микробная ремедиация. Фиторемедиация в основном используется для очистки от загрязнения тяжелыми металлами и может быть разделена на растения с гипераккумуляцией и культуры с низким

накоплением в зависимости от метода рекультивации. Микробная ремедиация, тем временем, в основном используется для рекультивации органического загрязнения и содействия фиторемедиации.

Чрезмерное использование пестицидов в процессе выращивания лука-шалота приводит к загрязнению почвы [47]. Местные бактерии в почве, которая предположительно загрязнена пестицидом хлорпирифосом, могут использоваться в качестве биоремедиационного агента почвы, загрязненной пестицидом хлорпирифосом. Целью данного исследования было выявление и получение консорциума бактерий, способных разлагать пестициды на полях лука-шалота, загрязненных пестицидом хлорпирифосом. Метод, используемый в данном исследовании, - это изоляция бактерий с использованием почвенного экстракта, морфологическая идентификация, молекулярная идентификация с использованием секвенирования следующего поколения (NGS), анализ индекса бактериального разнообразия и тест на разложение бактерий консорциума с целью снижения уровней пестицида хлорпирифос. Результаты данного исследования показали, что на каждом участке исследования было обнаружено 16 изолятов бактерий, которые были устойчивы к 100 ppm пестицида хлорпирифоса, поэтому эти изоляты были выбраны для использования в качестве консорциума бактерий. Молекулярная идентификация бактериального консорциума показала, что существует 10 родов, состоящих из *Cutibacterium, Streptomyces, Staphylococcus, Ensifer, Ochrobactrum, Achromobacter, Escherichia shigella, Klebsiella, Acinetobacter* и *Pseudomonas.* Индекс бактериального разнообразия в почвах шалота достигал 2040 и 1467 на лесных почвах. Эффективность снижения бактериального консорциума с использованием метода выращивания клеток и супернатанта составила 94,48% и 98,88% соответственно.

Целью обзора [48] является разработка потенциальных применений различных биологических агентов для дезактивации сельскохозяйственных почв, которые были загрязнены постоянными и более высокими дозами пестицидов посредством процесса биодеградации. Биодеградация является экологически чистым, экономически эффективным, высокоэффективным подходом и может рассматриваться как превосходная альтернатива физическим и химическим методам, которые не только технически трудоемки и дороги; и недостаточны для полной деградации органических токсинов. Разработка экспериментальных условий, в которых все соответствующие биологические агенты применяются одновременно, может быть многообещающей стратегией для усиления биодеградации и последующей биодеградации. Еще многое предстоит сделать для проведения полевых исследований на основе результатов/экспериментов в лабораторном масштабе с использованием эндофитных и ризосферных бактерий, связанных с растениями, для деградации широкого спектра токсичных органических соединений, вызывающих беспокойство в окружающей почве, до создания коммерчески жизнеспособных систем.

4-томная монография посвящена использованию микробной биоремедиации и фиторемедиации для очистки почвы от загрязняющих веществ, таких как пестициды, нефтяные углеводороды, металлы и хлорированные растворители, которые снижают плодородие почвы и делают ее непригодной для роста растений [49]. Тома охватывают множество разнообразных экологически чистых микробных биоремедиаций и фиторемедиации методов для устойчивого управления почвой. Том 4: посвящен изучению деградации пестицидов и полихлорированных бифенилов; он рассматривает деградацию

пестицидов, деградацию ПХБ и генетические вмешательства. Он начинается с описания деградации экологических пестицидов, механизмов и устойчивости, микробов и микробных ферментов, взаимодействия растительных микробов, деградации фосфорорганических соединений и деградации эндосульфана. Затем он продолжает обсуждать ПХБ и деградацию, циперметрин, деградацию *Phanerochaete chrysosporium*, а также карвон и поверхностно-активные вещества для деградации ПХБ. В книге также отстаиваются генетические системы для деградации ПХБ и пестицидов с обсуждением различных преимуществ и недостатков каждой стратегии и различных методов. Другие тома в 4-томном наборе: • Том 1: Фундаментальные аспекты и загрязненные участки; • Том 2: Микробные подходы и последние тенденции; • Том 3: Изобретательские методы, методы исследования и примеры. Вместе эти четыре тома дают глубокое освещение механизмов, преимуществ и недостатков технологий биоремедиации и фиторемедиации для безопасного и устойчивого управления почвой.

Трифлуралин (TFL) — это высокостойкий гербицид с сильной адсорбционной способностью на частицах почвы [50]. Целью данного исследования было выделение микробных консорциумов и бактериальных штаммов из почвы с историческим применением пестицидов для оценки их потенциала деградации TFL в почве. Были рассмотрены различные методы биоремедиации для повышения эффективности деградации TFL в почве. Эти методы включали: i) биостимуляцию с использованием раствора питательных веществ (NS); ii) биоаугментацию с использованием естественного микробного консорциума (NMC), семи отдельных бактериальных штаммов, выделенных из NMC, и искусственного бактериального консорциума, образованного семью бактериальными штаммами, деградирующими TFL (ABC); iii) повышение биодоступности с использованием биоразлагаемого соединения, случайно метилированного циклодекстрина, RAMEB. Биостимуляция с использованием NS приводит к биодеградации до 34 % почвенного TFL через 100 дней. При инокуляции загрязненной почвы консорциумами NMC или ABC потеря TFL увеличилась до 62% и 74% соответственно, при значениях DT_{50} (время, необходимое для снижения концентрации загрязняющего вещества до половины от первоначального значения) 5,9 и 11 дней. В случае инокуляции почвы изолированными индивидуальными бактериальными штаммами степень биодеградации TFL варьировалась в широких пределах от 2,3% до 55%. Наиболее эффективным бактериальным штаммом был *Arthrobacter aurescens* CTFL7, который ранее не был описан в литературе как бактерия, разрушающая TFL. Биоаугментация с бактерией CTFL7 также была протестирована в присутствии RAMEB, вызвав резкое увеличение биодеградации гербицида до 88%, достигнув DT50 всего 19 дней. Циклодекстрины никогда ранее не тестировались на предмет усиления биодеградации TFL. Был проведен анализ экотоксичности для подтверждения того, что предложенные методы биоремедиации также способны снижать токсичность. Тест Microtox® показал, что после применения *A. aurescens* CTF7 и *A. aurescens* CTF7 + RAMEB почва, загрязненная TFL, которая изначально проявляла острую токсичность, стала нетоксичной в конце экспериментов по биодеградации.

В настоящее время на территории Кыргызстана существует 50 хранилищ устаревших пестицидов, в которых хранится около 5000 тонн этих опасных химикатов. Условия хранения давно стали непригодными [51]. Они представляют серьезную угрозу

для проживающих там людей, скота и окружающей среды. Основной целью данного исследования было использование отобранных бактерий с генами цитохрома P450 для биоремедиации загрязненных почв вокруг мест захоронения в модельных почвенных экспериментах. В первом опыте экспериментов по биодеградации использовалась одна загрязненная почва без каких-либо изменений химического состава, а во втором - физико-химический состав почвы был улучшен для поддержания условий биоремедиации. Почвы в обоих вариантах обрабатывались 3 раза (т.е. один раз в месяц) суспензиями одной культуры или смеси активных бактерий (1×10^8 клеток/мл), отобранных в экспериментах по биодеградации *in vitro*. Также были запущены два контрольных образца без добавления культуры бактерий. Количественная оценка целевых стойких органических загрязнителей (СОЗ) до и после биодеградации проводилась методом капиллярной газовой хроматографии (ГХ), сопряженной с масс-спектрометром. За 6 месяцев устаревшие пестициды, такие как дильдрин, α-эндосульфан, β-эндосульфан и 4-гептахлор-эпокс чистый, смогли почти полностью разложиться, до 98% - 99,0%, смесью бактерий и одной культурой бактерий. Альдегид эндрина показал большую устойчивость, поскольку смесь бактерий смогла разложить его до 59,77%. Для улучшения аэробной деградации для устранения пестицидов из загрязненных почв необходимо создать оптимальные агротехнические и агрохимические условия.

Широкое использование пестицидов негативно влияет на окружающую среду и людей. Биоремедиация пестицидов с использованием экологически чистых методов имеет первостепенное значение [52]. В этом исследовании оценивается биоремедиация хлорпирифоса в почве с использованием местного штамма *Bacillus cereus Ct3*, выделенного из почв, где выращивается хлопчатник. Штаммы были идентифицированы с помощью риботипирования (16s рРНК) компанией Macrogen (Macrogen Inc. Geumchen-gu, Южная Корея). *Bacillus cereus Ct3* был устойчив к концентрации хлорпирифоса до 125 мг/л и успешно разлагал 88% хлорпирифоса за 8 дней при pH 8. *Bacillus cereus Ct3* переносил температуру около 30-40 °C, что является хорошим признаком для биоремедиации *in situ*. Были протестированы зеленый компост, навоз и рисовая шелуха, где результаты ANOVA ($P < 0,05$) и дизайна Плакетта-Бермана показали, что навоз оказывает значительное влияние на деградацию. Он сократил лаг-фазу и довел максимальную деградацию до 88%. Размер инокулята является статистически значимым ($P < 0,05$) фактором и ниже 10^6 (КОЕ $г^{-1}$) показывает лаг-фазу 4-6 дней. Результаты модели Михаэлиса-Ментена были следующими; $R_2 = 0,9919$, $V_{max} = 18,8$, $Ks = 121,4$ и $V_{max}/Ks = 0,1546$. Исследование ГХ-МС показало, что хлорпирифос сначала превратился в диэтилтиофосфорную кислоту и 3,5,6-трихлор-2-пиридинол (TCP). Позже кольцо TCP было разорвано, и он был полностью минерализован без какого-либо токсичного побочного продукта. Для исследования влияния пяти факторов использовался дизайн Плакетта-Бермана. Коэффициент корреляции (R_2) между экспериментальным и прогнозируемым значением составляет 0,94. Центральный композитный дизайн (CBD) использовался с матрицей дизайна из тридцати одного прогнозируемого и экспериментального значения деградации хлорпирифоса, имея «значение P отсутствия соответствия» «0,00». Полученный коэффициент регрессии составил $R_2 = 0,93$, что указывает на то, что экспериментальные значения и прогнозируемые значения близко соответствуют друг другу. Наиболее значимыми факторами, выделенными на графиках CBD/ANOVA и поверхностного отклика, были концентрация хлорпирифора и

размер инокулята. *Bacillus cereus Ct3* эффективно разлагал хлорпирифос и может успешно использоваться для биоремедиации почв, загрязненных хлорпирифосом.

В работе [53] оценивается эффективность дискретных бактериальных консорциумов в биоремедиации супесчаной суглинистой почвы, преднамеренно загрязненной 20 мг/кг хлорантранилипрола (CAP). Оно отслеживает изменения в общей популяции бактерий и выбросах CO_2, отслеживая остаточные уровни CAP с помощью УФ-сканирования и анализа ВЭЖХ. Шесть активных бактериальных деструкторов (четыре штамма *Bacillus (B. subtilis subsp. subtilis AZFS3, B. pumilus AZFS5, B. mojavensis AZFS15* и *B. paramycoides AZFS18),* один штамм *Alcaligenes (A. aquatilis KZFS11)* и один штамм *Pseudomonas (P. aeruginosa KZFS4*)) использовались в отдельных или комбинированных препаратах и выращивались на триптиказо-соевом бульоне в течение 24 ч при 30°C перед приготовлением инокулянтов и корректировкой количества бактериальных клеток до 10^7 КОЕ/сухой вес г почвы. Бактериальные консорциумы были добавлены в почву, загрязненную CAP, и инкубированы в течение 20 дней при температуре 30 °C. Ди-, тетра- и гексабактериальные консорциумы зарегистрировали самые высокие уровни жизнеспособных бактерий, достигнув своего пика через 3–11 дней инкубации. Затем они снизились до минимальных уровней к концу 20 дней, что совпало с полным удалением CAP из почвы. В конце инкубационного периода (20 дней) CAP в основном подвергся биодеградации, показав показатели биодеградации 90,05%, 93,65% и 98,65% для T3, T4 и T5 соответственно. Это совпало с самым высоким средним производством CO_2. На основании результатов анализа ВЭЖХ консорциум гексабактерий T5 продемонстрировал самую высокую скорость биодеградации CAP (99,33%) после 20-дневного инкубационного периода, что привело к самому низкому остаточному уровню CAP в почве (0,67%). Биоинформационный анализ предсказал, что путь биодеградации CAP достиг CO_2 и H_2O. В оптимизированных условиях консорциум гексабактерий является наиболее эффективным биодеградируемым CAP и рекомендуется в качестве экологически безопасной обработки для устранения загрязнения CAP в полевых условиях.

Целью данной работы была оценка потенциала *Trichoderma spp*. в биоремедиации гербицидов и биостимуляции растений в почвах, загрязненных гербицидами. На первом этапе эксперимент проводился по полностью рандомизированной схеме 4 × 3 × 4 с пятью повторениями, четырьмя штаммами *Trichoderma spp*., тремя гербицидами и четырьмя дозами гербицидов [54]. Индекс скорости роста мицелия (MGSI) *Trichoderma spp*. был получен путем выращивания его в чашке Петри с PDA, связанным с различными дозами гербицидов, и оценивался каждые 24 часа в течение 10 дней. Результаты указали на выбор *Trichoderma harzianum* T1A для продолжения эксперимента, поскольку он показал увеличение MGSI с гербицидом метсульфурон-метил. Гербициды индазифлам и атразин снизили развитие *Trichoderma spp*. На втором этапе оценивали огурцы, выращенные по схеме, соответствующей трем дозам гербицида метсульфурон-метила, а также с применением и без применения *T. harzianum* T1A в шести горшках, содержащих по два растения на горшок, всего 12 растений/повторностей на обработку. Параметры хлорофилла a, хлорофилла b, общий индекс хлорофилла, высота растения, фитотоксичность, индекс площади листьев, сухая масса надземной части, длина корня и сухая масса корня оценивались у растений огурца. Применение гербицида вызвало фитотоксичность у растений огурца и снизило все параметры развития, оцененные при первом выращивании. Фитотоксический эффект все еще наблюдался при втором выращивании, что привело к

снижению сухой массы корней и побегов при использовании метсульфурон-метила. Результаты показали, что *T. Harzianum* T1A оказал значительное благоприятное воздействие на развитие огурцов, увеличив высоту растений на 36%, индекс площади листьев на 71%, длину корней на 23%, сухую массу побегов на 54% и сухую массу корней на 21% в первой культуре при всех использованных дозах гербицида. Во второй культивации не наблюдалось значительного эффекта от применения *Trichoderma*. Таким образом, T. *harzianumT1A* способствует биостимуляции растений в почве, загрязненной метсульфурон-метилом, и может способствовать биоремедиации

Биоремедиация с использованием консорциумов актинобактерий оказалась многообещающей альтернативой для очистки совместно загрязненных сред. В этом смысле четверной консорциум, состоящий из *Streptomyces sp. M7, MC1, A5* и *Amycolatopsis tucumanensis AB0,* смог удалить значительные уровни Cr(VI) и линдана из антропогенно загрязненных почв [55]. Однако эффективность процесса биоремедиации не может быть оценена только с помощью аналитического мониторинга, который сложен в основном из-за характеристик матрицы, производящей неколичественные извлечения аналитов или помех на этапе обнаружения и количественной оценки. Однако эффективность процесса биоремедиации не может быть оценена только с помощью аналитического мониторинга, который сложен в основном из-за характеристик матрицы, из-за извлечения неколичественных аналитов или помех на этапе обнаружения и количественной оценки. По этой причине важно иметь экологически значимые инструменты для оценки биологического воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду. В этом контексте целью данной работы было установление соответствующих биопроб для оценки эффективности процесса биоремедиации совместно загрязненных почв. Для этого были изучены пять модельных видов: четыре вида растений (*Lactuca sativa, Raphanus sativus, Lycopersicon esculentum* и *Zea mays*) и один вид животных (*Eisenia fetida*). Для видов растений оценивались биомаркеры ингибирования прорастания (IG) и длина гипокотилей/пара и корешков/корней проростка. В то время как для *E. fetida* были протестированы смертность (M), потеря веса, концентрация целомоцитов и жизнеспособность клеток. Эти биоиндикаторы и набор биомаркеров, количественно определенных в них, показали разный уровень чувствительности, от максимального до минимального: *E. fetida* > *L. esculentum* > *L. sativa* > *R. sativus* ⋙*Z. mays*. Поэтому *E. fetida* и *L. esculentum* и их соответствующие биомаркеры были выбраны для оценки эффективности процесса биоремедиации из-за возможности оценки воздействия на флору и фауну почвы соответственно. Совместное применение этих биоиндикаторов в процессе биоремедиации в полевых масштабах является осуществимым инструментом для демонстрации восстановления качества и здоровья почвы.

Ремедиация новых загрязняющих веществ представляет собой насущную экологическую проблему, требующую инновационных подходов для эффективного смягчения последствий [56,57]. В этой обзорной статье [56] рассматривается неиспользованный потенциал микробных сообществ почвы в биоремедиации новых загрязняющих веществ. Биоремедиация, хотя и является многообещающим методом, часто оказывается трудоемкой и требует глубокого понимания микробных тонкостей для улучшения. Учитывая проблемы, связанные с невозможностью культивировать многие из этих микроорганизмов, обычные методы недостаточны для достижения этой цели. В то

время как методы на основе омики обеспечивают инновационный подход к пониманию фундаментальных аспектов, процессов и связей между микроорганизмами, которые необходимы для улучшения стратегий биоремедиации. Изучая последние достижения в области технологий омики, этот обзор направлен на то, чтобы пролить свет на то, как эти подходы могут раскрыть скрытые возможности микробных сообществ почвы, прокладывая путь для более эффективных и устойчивых решений по ремедиации.

В наших работах [58-65] исследованы особенности изменения фракционного состава нефти после ее биодеградации различными микроорганизмами в загрязненных почвах нефтяного месторождения Бинагади на Апшеронском полуострове. В лабораторных условиях изучена деструктивная активность некоторых углеводородокисляющих культур и их ассоциаций, выделенных из нефтезагрязненных почв, в отношении углеводородов нефти. Нефтедеструктивную активность исследуемых ассоциаций микроорганизмов оценивали по суммарному показателю, определяемому весовым методом убыли нефти и нефтепродуктов в жидкой среде. Фитотоксичность почв оценивалась биотестом с помощью семян пшеницы по соотношению числа проросших и не проросших семян, высоты проростков и длины корней. Проведен сопоставительный анализ результатов изучения особенностей изменения составов сырых нефтей и нефтяных загрязнений, подверженных микробиологической деструкции в жидкой минеральной среде и в почве. Использование метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье позволяет проанализировать особенности изменения химического состава загрязняющей почвы нефти под влиянием микробиологического окисления и предположить переход ее в более глубокую стадию деградации. Полученные данные свидетельствуют о том, что микробиологические процессы способствуют ароматизации и депарафинизации компонентов исследованной нефти. Также было установлено, что под влиянием микробиологических процессов возрастает степень окисленности нефти за счет увеличения содержания карбонилсодержащих соединений. Следует отметить, что в спектрах наблюдаются полосы поглощения, обусловленные образованием соединений с непредельной связью, а также азотсодержащих соединений. На основе полученных экспериментальных данных можно предположить, что исходная нефть переходит в более глубокую стадию деградации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang X., Guining L. Editorial: Bioremediation of Chemical Pesticides Polluted Soil // Front. Microbiol. 2021. Vol. 21. Pp. 343-357
2. Raffa C-M., Chiampo F. Bioremediation of Agricultural Soils Polluted with Pesticides: A Review // Bioengineering (Basel). 2021. Vol. 8. N 7. Pp. 92-101
3. Ortiz-Hernandez M.L., Rodriguez A., Sanches-Salinas E., Castrejon-Godinez M.L. Bioremediation of Soils Contaminated with Pesticides: Experiences in Mexico // Chapter 5 in book Bioremediation in Latin America. 2014. Pp. 69-99
4. Ataikiru T.L., Ajuzieogu Ch.A. Enhanced bioremediation of pesticides contaminated soil using organic (compost) and inorganic (NPK) fertilizers // Heliyon. 2023, Vol. 9 , N 12, Pp. 23133-23139
5. Chen M., Piao X., Zeng G., Yang Ch. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by

composting: Applications, microbes and future research needs // Biotechnology Advances. 2015. Vol. 33. N 6. Pp. 745-755

6. Beloyezhets L.A., Levchuk A.A., Pristavka E.O. Prospects for application of microorganisms in bioremediation of soils contaminated with pesticides // Journal of Environmental Science and Health. Part B. 2024. Vol. 59. N 1. Pp. 15-20
7. Castelo-Grande T., Augusto P.A., Monteiro P., Estevez A.M., Barbosa D. Remediation of soils contaminated with pesticides: a review //International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2010. Vol. 90. Pp. 438-467
8. Randika J.L., Bandara P.K., Soysa H.S., Ruwandeepika H.A. Bioremediation of pesticide-contaminated soil – a review on indispensable role of soil bacteria // Journal of Agricultural Science – Sri-Lanka. 2022. Vol .17. N 1. Pp. 19-43
9. Kuhad R.C., Johri A.K. Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soils // Chapter in book Applied Bioremediation and Phytoremediation. 2004. Pp. 35-54
10. Baldissarelli D.P., Vargas D., Korf E., Galon L. Remediation of Soils Contaminated by Pesticides Using Physicochemical Processes: a Brief Review // Planta Daninha. 2019. Vol. 37. Pp. 124-137
11. Cycon M. Bioremediation of Soils Contaminated with Pharmaceuticals, Pesticides, Petroleum and Other Organic Compounds // Toxics. 2022. Special issue. Pp. 273-286
12. Tarla D.N., Erickson L.E., Hettiarachchi G., Amadi S. Phytoremediation and Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soil // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. N 4. Pp. 1217-1226
13. Baczynski T.P., Pleissner D., Krylow M. Bioremediation of Chlorinated Pesticides in Field-Contaminated Soils and Suitability of Tenax Solid-Phase Extraction as a Predictor of Its Effectiveness // CLEAN. Soil. Air. Water. 2012. Vol. 40. N 8. Pp. 864-869
14. Giri V.Sh., Geed S., Vikrant K., Sang S.L. Progress in bioremediation of pesticide residues in the environment // Environ. Eng. Res. 2021. Vol. 26. N 6. Pp. 200446-200482
15. Wahta V., Shukla Sh. Role of Microorganisms in Bioremediation of Pesticides // Chapter in book : Research Anthology on Emerging Techniques in Environmental Remediation. 2022. 27 p.
16. Singh Y., Saxena M.K. Insights into the recent advances in nano-bioremediation of pesticides from the contaminated soil // Front. Microbiol. 2023. Vol. 13. Pp. 633-647
17. Sanbrano G., Kirichuk A.A. Биоремедиация загрязненных почв пестицидами с использованием микроорганизмов - ситуация в Колумбии // Вестник Российского Университета дружбы народов. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 1. С. 7-19.
18. Sanchez-Hernandez J.C. Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soils by using Earthworms // Chapter in book Bioremediation of Agricultural Soil. 2019. 28 p.
19. Geetha M., Fulekar M.H. Bioremediation of pesticides in surface soil treatment unit using microbial consortia // African Journal of Environmental Science and Technology. 2008. Vol. 2. N 2. Pp. 141-152
20. Wong W-L., Pangging M., Rubivatno K. Bioremediation of Pesticide Contaminated Soils through composting – mechanisms, factors and prospects // Industrial and Domestic Water Management. 2023. Vol. 3. N 2. Pp. 103-114
21. Morilo E., Villaverde J. Advanced technologies for the remediation of pesticide2 contaminated soils // Science of the Total Environment. 2017. N 2. Pp. 1-64

22. Russo F., Ceci A., Pinzari F., Siciliano A. Bioremediation of Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT)-Contaminated Agricultural Soils: Potential of Two Autochthonous Saprotrophic Fungal Strains // Applied and Environmental Microbiology. 2019. Vol. 85. N 21. Pp. 132-139
23. Srinivasulu M., Chandra M., Maddela N.R. Microbial Bioremediation and Amelioration of Pesticide-Contaminated Soils // Chapter in book Biore,ediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management. 2022. 26 p.
24. Robles-Gonzalez I.V., Faya F., Pogai-Varaldo H. A review on slurry bioreactors for bioremediation of soils and sediments // Microbial Cell Factories. 2008. Vol. 7. Pp. 29-36
25. Erguven G.O., Yildirim N. Microbial bioremediation of pesticides from contaminated environments // III-rd International Agricultural, Biological and Life Science Conference. Turkey. 1-3 september 2021. Pp. 1-9
26. Jaiswal S., Kiran-Bara J., Soni R., Shrivastava Kh. Bioremediation of Chlorpyrifos Contaminated Soil by Microorganism // International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology. 2017. Vol. 2. N 4. Pp. 1624-1630
27. More V., Sehar A.E., Shshadri A.P., Rajanna S. Bioremediation of Pesticides Containing Soil and Water // Chapter in book Biotechnology for Zero Waste: Emerging Waste Management Techniques. 2022. 136 p.
28. Uqab B., Mudasir S., Nazir R. Review on Bioremediation of Pesticides // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2016. Vol. 7. Pp. 343-349
29. Nguyen T-B., Toan N-V., Pham T., Hang T. Biodegradation of organ chlorine pesticides in contaminated soil collected from Yen Tap Cam Khe, Phu Tho // Annual Reports of VAEC. 2007. N 2. Pp. 135-140
30. Karimi H., Mahdavi Sh., Lajayer B., Mogniseh E., Rajput V. Insights on the bioremediation technologies for pesticidecontaminated soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. N 4. Pp. 1329-1364
31. Harlina A., Mardiana I.A., Nagarajah R., Pukallenthy N.R. Bioremediation of Pesticides in the Environment // Chapter in book Bioremediation Technologies. 2023. 138 p.
32. Velazquez-Fernandez J.B., Martinez-Rizo A.B., Ramirez-Sando M., Dominguez-Ojeda Biodegradation and Bioremediation of Organic Pesticides // Chapter in book Pesticides-Recent Trends in Pesticide Residue Assay. 2012. 342 p.
33. Shiomi N. A Novel Bioremediation Method for Shallow Layers of Soil Polluted by Pesticides // Chapter in book Applied Bioremediation – Active and Passive Approaches. 2013. 235 p.
34. Abdelmoniem N., Hammad S., Mohammed A., Ishag A. Bacterial and vermi-remediation of soil contaminated with chlorpyrifos insecticide // African Journal of Biotechnology. 2020. Vol. 19. N 1. Pp. 26-32
35. Zalesny R.S., Casler M., Hailet R., Chung N.L. Bioremediation and soils // Chapter 9 in book Soil and Landscape. 2021. Pp. 237-275
36. 36.Adhikari D., Perwira I., Araki K., Kobo M. Stimulation of soil microorganisms in pesticide-contaminated soil using organic materials // AIMS Bioengineering. 2016. Vol. 3. N 3. Pp. 379-388

37. Debarati P., Pandev G., Meier Ch., Roelof J. Bacterial community structure of a pesticide-contaminated site and assessment of changes induced in community structure during bioremediation // FEMS Microbiology Ecology. 2006. Vo;. 57. N 1. Pp. 116-127
38. Priyanka G., Nidhi G., Ankita P., Shah I. Bioremediation of pesticides – a review // Towards Excellence. 2020. Vol. 12. N 5. Pp. 507-526
39. Radhika M., Kannahi M. Bioremediation of pesticide (Cypermethrin) using bacterial species in contaminated soil // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2014. Vol. 3. N 7. Pp. 425-435
40. Belal E. Bioremediation of pesticides-contaminated soils // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2018. Vol. 9. Pp. 349-362
41. Kavita R., Dhania G. Bioremediation and Biodegradation of Pesticide from Contaminated Soil and Water -A Noval Approach // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2014. Vol. 3. N 10. Pp. 23-33
42. Eevers N., Whitex J., Vangronsveld J., Weyens N. Bio- and Phytoremediation of Pesticide-Contaminated Environments: A Review // Advances in Botanical Research. 2017. Vol. 85. Pp. 277-311
43. Aioub A., Yankai L., Xingtao Q., Zhaonong H. Reduction of soil contamination by cypermethrin residues using phytoremediation with Plantago major and some surfactants // Environmental Science Europe. 2019. Vol. 31. N 26. Pp. 1-12
44. Rastimesina I., Tolocichina S., Postolachi O.M., Mamaliga V. Estimation of Efficiency of Bio- and Phytoremediation for Pesticides Contaminated Soil // Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca Agriculture. 2015. Vol. 72. N 2. Pp. 707-711
45. Tejomyee S., Bhalerao T. Bioremediation of endosulfan-contaminated soil by using bioaugmentation treatment of fungal inoculant Aspergillus niger // Turkish Journal of Biology. 2012. Vol. 36. N 5. Pp. 561-567
46. Weijun Q., Xinyue L., Lianghe L., Zhu Zh. Advances in Bioremediation of Agricultural Soil Contamination // EIS Web of Conferences. 2023. Vol. 406. Pp. 137-142
47. Rosariastuti R., Rahmawati Y., Sumani S., HartatiS. Identification and pesticide degradation test of bacterial consortium of contaminated soil // Sains Tanah – Journal of Soil Science and Agroclimatology. 2023. Vol. 20. N 1. Pp. 78-83
48. Nawaz Kh., Hussain Kh., Choudary N., Lashari M. Eco-friendly role of biodegradation against agricultural pesticides hazards // African Journal of Microbiology Research. 2004. Vol. 5. N 3. Pp. 177-183
49. Malik A., Goyal M.R., Wani Kh.A. Bioremediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management // Volume 4: Degradation of Pesticides and Polychlorinated Biphenyls. 2022. 476 P.
50. Lara-Moreno A., Morillo E., Merchan F., Madrid F. Bioremediation of a trifluralin contaminated soil using bioaugmentation with novel isolated bacterial strains and cyclodextrin // Science Total Environment. 2022. Vol. 840. Pp. 156695-156702
51. Doolotkeldieva T., Bobusheva S., Konurbaeva M.. The Improving Conditions for the Aerobic Bacteria Performing the Degradation of Obsolete Pesticides in Polluted Soils // Air, Soil and Water Research. 2021. N 12. Pp. 31-37

52. Farhan M., Maqsood A., Kanwal A., Ali-Butt Z. Biodegradation of chlorpyrifos using isolates from contaminated agricultural soil, its kinetic studies // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. N 1. Pp. 10320-10328
53. Fahmy M., Salem S., Abd-El-Fattah H., Fayez M. Insights into the role of hexa-bacterial consortium for bioremediation of soil contaminated with chlorantraniliprole // Environmental Sciences Europe. 2024. Vol. 36. Pp. 197-204
54. Conte E.D., da Rosa E.,Rieth-Silvetrini G., Motta D. Can *Trichoderma* Spp. Contribute to the Bioremediation and Biostimulation of Plants in Soil Contaminated with Herbicides? // ACS Omega. 2025. Vol. 40. N 30, Pp. 100-120
55. Aparacio J.D., Garcia-Velasco N., Unonabarrenetxea E., Soto M. Evaluation of the effectiveness of a bioremediation process in experimental soils polluted with chromium and lindane // Ecotoxicol. Environm. Saf. 2019. Vol. 181. Pp. 255-263
56. Alidoosti F., Giyahchi M., Moien Sh., Moqhimi H. Unlocking the potential of soil microbial communities for bioremediation of emerging organic contaminants: omics-based approaches// Microbial Cell Factories. 2024. Vol. 23. Pp. 210-217
57. Hofer U. Pesticides and soil viruses // Nat. Rev. Microbiol. 2022. Vol. 20. N 4. Pp. 189-215
58. Бабаев Э.Р. Микробиологическая деструкция нефти в почвах Апшеронского полуострова // Территория Нефтегаз. 2017. № 11. С. 64-76
59. Mamedova P.Sh., Babayev E.R., Sultanova S.A., Kahramanova K.R., Yagubova A.V. Evalution of microorganism numbers in samples of petroleum contaminated soils from territories of Apsheron region // Экоэнергетика. 2007. № 2. с.32-33.
60. Мамедова П.Ш., Кахраманова К.Р., Бабаев Э.Р., Алиева Х.Ш. Выделение активных углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязненных почв Сураханского месторождения // Азербайджанский химический журнал. 2008. № 3. С.59-62.
61. Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Мамедова П.Ш. Анализ активности отдельных штаммов-деструкторов нефтепродуктов и их ассоциаций для очистки нефтезагрязненных почв // Процессы нефтехимии и нефтепереработки. 2008. № 3-4(35-36). С. 229- 231.
62. Фарзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Кулиева Д.М. Выбор оптимальных питательных сред и условий культивирования для активного роста микроорганизмов-деструкторов нефти // Процессы нефтехимии и нефтепереработки. 2008., № 3-4(35-36). С. 177- 181.
63. Бабаев Э.Р., Мовсумзаде М.Э. Преобразование нефти в процессе микробиологической деградации в почве // Башкирский химический журнал. 2009. т. 6. № 3. с.80-85.
64. Бабаев Э.Р., Мовсумзаде М.Э., Мамедова П.Ш., Кулиева Д.М., Велиева Ф.М. Оптимизация состава питательных сред для нефтеокисляющих дрожжевых культур рода *Candida* // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2010. № 11. С. 46-51.
65. Бабаев Э.Р. Изучение микробиологического преобразования углеводородов нефтезагрязненных почв // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии, Реактив-2009. Уфа. 2009. С. 209-211

REFERENCES

1. Huang X., Guining L. Editorial: Bioremediation of Chemical Pesticides Polluted Soil // Front. Microbiol. 2021. Vol. 21. Pp. 343-357.
2. Raffa C-M., Chiampo F. Bioremediation of Agricultural Soils Polluted with Pesticides: A Review // Bioengineering (Basel). 2021. Vol. 8. N 7. Pp. 92-101.
3. Ortiz-Hernandez M.L., Rodriguez A., Sanches-Salinas E., Castrejon-Godinez M.L. Bioremediation of Soils Contaminated with Pesticides: Experiences in Mexico // Chapter 5 in book Bioremediation in Latin America. 2014. Pp. 69-99.
4. Ataikiru T.L., Ajuzieogu Ch.A. Enhanced bioremediation of pesticides contaminated soil using organic (compost) and inorganic (NPK) fertilizers // Heliyon. 2023, Vol. 9 , N 12, Pp. 23133-23139.
5. Chen M., Piao X., Zeng G., Yang Ch. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs // Biotechnology Advances. 2015. Vol. 33. N 6. Pp. 745-755.
6. Beloyezhets L.A., Levchuk A.A., Pristavka E.O. Prospects for application of microorganisms in bioremediation of soils contaminated with pesticides // Journal of Environmental Science and Health. Part B. 2024. Vol. 59. N 1. Pp. 15-20.
7. Castelo-Grande T., Augusto P.A., Monteiro P., Estevez A.M., Barbosa D. Remediation of soils contaminated with pesticides: a review //International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2010. Vol. 90. Pp. 438-467.
8. Randika J.L., Bandara P.K., Soysa H.S., Ruwandeepika H.A. Bioremediation of pesticide-contaminated soil – a review on indispensable role of soil bacteria // Journal of Agricultural Science – Sri-Lanka. 2022. Vol .17. N 1. Pp. 19-43.
9. Kuhad R.C., Johri A.K. Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soils // Chapter in book Applied Bioremediation and Phytoremediation. 2004. Pp. 35-54
10. Baldissarelli D.P., Vargas D., Korf E., Galon L. Remediation of Soils Contaminated by Pesticides Using Physicochemical Processes: a Brief Review // Planta Daninha. 2019. Vol. 37. Pp. 124-137.
11. Cycon M. Bioremediation of Soils Contaminated with Pharmaceuticals, Pesticides, Petroleum and Other Organic Compounds // Toxics. 2022. Special issue. Pp. 273-286
12. Tarla D.N., Erickson L.E., Hettiarachchi G., Amadi S. Phytoremediation and Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soil // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. N 4. Pp. 1217-1226
13. Baczynski T.P., Pleissner D., Krylow M. Bioremediation of Chlorinated Pesticides in Field-Contaminated Soils and Suitability of Tenax Solid-Phase Extraction as a Predictor of Its Effectiveness // CLEAN. Soil. Air. Water. 2012. Vol. 40. N 8. Pp. 864-869
14. Giri V.Sh., Geed S., Vikrant K., Sang S.L. Progress in bioremediation of pesticide residues in the environment // Environ. Eng. Res. 2021. Vol. 26. N 6. Pp. 200446-200482
15. Wahta V., Shukla Sh. Role of Microorganisms in Bioremediation of Pesticides // Chapter in book : Research Anthology on Emerging Techniques in Environmental Remediation. 2022. 27 p.
16. Singh Y., Saxena M.K. Insights into the recent advances in nano-bioremediation of pesticides from the contaminated soil // Front. Microbiol. 2023. Vol. 13. Pp. 633-647
17. Sanbrano G., Kirichuk A.A. Биоремедиация загрязненных почв пестицидами с использованием микроорганизмов - ситуация в Колумбии // Вестник Российского

Университета дружбы народов. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 1. С. 7-19.
18. Sanchez-Hernandez J.C. Bioremediation of Pesticide-Contaminated Soils by using Earthworms // Chapter in book Bioremediation of Agricultural Soil. 2019. 28 p.
19. Geetha M., Fulekar M.H. Bioremediation of pesticides in surface soil treatment unit using microbial consortia // African Journal of Environmental Science and Technology. 2008. Vol. 2. N 2. Pp. 141-152
20. Wong W-L., Pangging M., Rubivatno K. Bioremediation of Pesticide Contaminated Soils through composting – mechanisms, factors and prospects // Industrial and Domestic Water Management. 2023. Vol. 3. N 2. Pp. 103-114.
21. Morilo E., Villaverde J. Advanced technologies for the remediation of pesticide2 contaminated soils // Science of the Total Environment. 2017. N 2. Pp. 1-64.
22. Russo F., Ceci A., Pinzari F., Siciliano A. Bioremediation of Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT)-Contaminated Agricultural Soils: Potential of Two Autochthonous Saprotrophic Fungal Strains // Applied and Environmental Microbiology. 2019. Vol. 85. N 21. Pp. 132-139.
23. Srinivasulu M., Chandra M., Maddela N.R. Microbial Bioremediation and Amelioration of Pesticide-Contaminated Soils // Chapter in book Biore, ediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management. 2022. 26 p.
24. Robles-Gonzalez I.V., Faya F., Pogai-Varaldo H. A review on slurry bioreactors for bioremediation of soils and sediments // Microbial Cell Factories. 2008. Vol. 7. Pp. 29-36
25. Erguven G.O., Yildirim N. Microbial bioremediation of pesticides from contaminated environments // III-rd International Agricultural, Biological and Life Science Conference. Turkey. 1-3 september 2021. Pp. 1-9
26. Jaiswal S., Kiran-Bara J., Soni R., Shrivastava Kh. Bioremediation of Chlorpyrifos Contaminated Soil by Microorganism // International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology. 2017. Vol. 2. N 4. Pp. 1624-1630
27. More V., Sehar A.E., Shshadri A.P., Rajanna S. Bioremediation of Pesticides Containing Soil and Water // Chapter in book Biotechnology for Zero Waste: Emerging Waste Management Techniques. 2022. 136 p.
28. Uqab B., Mudasir S., Nazir R. Review on Bioremediation of Pesticides // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2016. Vol. 7. Pp. 343-349.
29. Nguyen T-B., Toan N-V., Pham T., Hang T. Biodegradation of organ chlorine pesticides in contaminated soil collected from Yen Tap Cam Khe, Phu Tho // Annual Reports of VAEC. 2007. N 2. Pp. 135-140.
30. Karimi H., Mahdavi Sh., Lajayer B., Mogniseh E., Rajput V. Insights on the bioremediation technologies for pesticidecontaminated soils // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. N 4. Pp. 1329-1364.
31. Harlina A., Mardiana I.A., Nagarajah R., Pukallenthy N.R. Bioremediation of Pesticides in the Environment // Chapter in book Bioremediation Technologies. 2023. 138 p.
32. Velazquez-Fernandez J.B., Martinez-Rizo A.B., Ramirez-Sando M., Dominguez-Ojeda Biodegradation and Bioremediation of Organic Pesticides // Chapter in book Pesticides-Recent Trends in Pesticide Residue Assay. 2012. 342 p.

33. Shiomi N. A Novel Bioremediation Method for Shallow Layers of Soil Polluted by Pesticides // Chapter in book Applied Bioremediation – Active and Passive Approaches. 2013. 235 p.
34. Abdelmoniem N., Hammad S., Mohammed A., Ishag A. Bacterial and vermi-remediation of soil contaminated with chlorpyrifos insecticide // African Journal of Biotechnology. 2020. Vol. 19. N 1. Pp. 26-32.
35. Zalesny R.S., Casler M., Hailet R., Chung N.L. Bioremediation and soils // Chapter 9 in book Soil and Landscape. 2021. Pp. 237-275.
36. Adhikari D., Perwira I., Araki K., Kobo M. Stimulation of soil microorganisms in pesticide-contaminated soil using organic materials // AIMS Bioengineering. 2016. Vol. 3. N 3. Pp. 379-388.
37. Debarati P., Pandev G., Meier Ch., Roelof J. Bacterial community structure of a pesticide-contaminated site and assessment of changes induced in community structure during bioremediation // FEMS Microbiology Ecology. 2006. Vo;. 57. N 1. Pp. 116-127.
38. Priyanka G., Nidhi G., Ankita P., Shah I. Bioremediation of pesticides – a review // Towards Excellence. 2020. Vol. 12. N 5. Pp. 507-526
39. Radhika M., Kannahi M. Bioremediation of pesticide (Cypermethrin) using bacterial species in contaminated soil // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2014. Vol. 3. N 7. Pp. 425-435.
40. Belal E. Bioremediation of pesticides-contaminated soils // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2018. Vol. 9. Pp. 349-362.
41. Kavita R., Dhania G. Bioremediation and Biodegradation of Pesticide from Contaminated Soil and Water -A Noval Approach // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2014. Vol. 3. N 10. Pp. 23-33
42. Eevers N., Whitex J., Vangronsveld J., Weyens N. Bio- and Phytoremediation of Pesticide-Contaminated Environments: A Review // Advances in Botanical Research. 2017. Vol. 85. Pp. 277-311
43. Aioub A., Yankai L., Xingtao Q., Zhaonong H. Reduction of soil contamination by cypermethrin residues using phytoremediation with Plantago major and some surfactants // Environmental Science Europe. 2019. Vol. 31. N 26. Pp. 1-12
44. Rastimesina I., Tolocichina S., Postolachi O.M., Mamaliga V. Estimation of Efficiency of Bio- and Phytoremediation for Pesticides Contaminated Soil // Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca Agriculture. 2015. Vol. 72. N 2. Pp. 707-711
45. Tejomyee S., Bhalerao T. Bioremediation of endosulfan-contaminated soil by using bioaugmentation treatment of fungal inoculant Aspergillus niger // Turkish Journal of Biology. 2012. Vol. 36. N 5. Pp. 561-567
46. Weijun Q., Xinyue L., Lianghe L., Zhu Zh. Advances in Bioremediation of Agricultural Soil Contamination // EIS Web of Conferences. 2023. Vol. 406. Pp. 137-142
47. Rosariastuti R., Rahmawati Y., Sumani S., HartatiS. Identification and pesticide degradation test of bacterial consortium of contaminated soil // Sains Tanah – Journal of Soil Science and Agroclimatology. 2023. Vol. 20. N 1. Pp. 78-83

48. Nawaz Kh., Hussain Kh., Choudary N., Lashari M. Eco-friendly role of biodegradation against agricultural pesticides hazards // African Journal of Microbiology Research. 2004. Vol. 5. N 3. Pp. 177-183
49. Malik A., Goyal M.R., Wani Kh.A. Bioremediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management // Volume 4: Degradation of Pesticides and Polychlorinated Biphenyls. 2022. 476 P.
50. Lara-Moreno A., Morillo E., Merchan F., Madrid F. Bioremediation of a trifluralin contaminated soil using bioaugmentation with novel isolated bacterial strains and cyclodextrin // Science Total Environment. 2022. Vol. 840. Pp. 156695-156702
51. Doolotkeldieva T., Bobusheva S., Konurbaeva M.. The Improving Conditions for the Aerobic Bacteria Performing the Degradation of Obsolete Pesticides in Polluted Soils // Air, Soil and Water Research. 2021. N 12. Pp. 31-37
52. Farhan M., Maqsood A., Kanwal A., Ali-Butt Z. Biodegradation of chlorpyrifos using isolates from contaminated agricultural soil, its kinetic studies // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. N 1. Pp. 10320-10328
53. Fahmy M., Salem S., Abd-El-Fattah H., Fayez M. Insights into the role of hexa-bacterial consortium for bioremediation of soil contaminated with chlorantraniliprole // Environmental Sciences Europe. 2024. Vol. 36. Pp. 197-204
54. Conte E.D., da Rosa E., Rieth-Silvetrini G., Motta D. Can *Trichoderma* Spp. Contribute to the Bioremediation and Biostimulation of Plants in Soil Contaminated with Herbicides? // ACS Omega. 2025. Vol. 40. N 30, Pp. 100-120
55. Aparacio J.D., Garcia-Velasco N., Unonabarrenetxea E., Soto M. Evaluation of the effectiveness of a bioremediation process in experimental soils polluted with chromium and lindane // Ecotoxicol. Environm. Saf. 2019. Vol. 181. Pp. 255-263.
56. Alidoosti F., Giyahchi M., Moien Sh., Moqhimi H. Unlocking the potential of soil microbial communities for bioremediation of emerging organic contaminants: omics-based approaches// Microbial Cell Factories. 2024. Vol. 23. Pp. 210-217
57. Hofer U. Pesticides and soil viruses // Nat. Rev. Microbiol. 2022. Vol. 20. N 4. Pp. 189-215
58. Babayev E.R. Microbiological destruction of oil in the soils of the Apsheron Peninsula // Territory of Oil and Gas. 2017. No. 11. Pp. 64-76
59. Mammadova P.Sh., Babayev E.R., Sultanova S.A., Kahramanova K.R., Yagubova A.V. Evaluation of microorganism numbers in samples of petroleum contaminated soils from territories of Apsheron region // Ecoenergetics. 2007. No. 2. Pp. 32-33.
60. Mammadova P.Sh., Kahramanova K.R., Babayev E.R., Aliyeva H.Sh. Isolation of active hydrocarbon-oxidizing bacteria from oil-contaminated soils of the Surakhani field // Azerbaijan Chemical Journal. 2008. No. 3. Pp. 59-62
61. Farzaliyev V.M., Babayev E.R., Mammadova P.Sh. Analysis of the activity of individual strains-destructors of oil products and their associations for cleaning oil-contaminated soils // Processes of petrochemistry and oil refining. 2008. No. 3-4 (35-36). Pp. 229- 231.
62. Farzaliyev V.M., Babayev E.R., Kulieva D.M. Selection of optimal nutrient media and cultivation conditions for active growth of microorganisms-destructors of oil // Processes of petrochemistry and oil refining. 2008., No. 3-4 (35-36). Pp. 177- 181.

63. Babayev E.R., Movsumzade M.E. Oil transformation during microbiological degradation in soil // Bashkir Chemical Journal. 2009. v. 6. № 3. Pp. 80-85.
64. Babayev E.R., Movsumzade M.E., Mammadova P.Sh., Kuliyeva D.M., Veliyeva F.M. Optimization of the composition of nutrient media for oil-oxidizing yeast cultures of the genus Candida // Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and advanced experience. 2010. № 11. Pp. 46-51.
65. Babayev E.R. Study of microbiological transformation of hydrocarbons in oil-contaminated soils // Chemical reagents, reagents and processes of low-tonnage chemistry, Reaktiv-2009. Ufa. 2009. Pp. 209-211.