



Обзор

Применение экологических нанотехнологий в Восстановление, Очистка сточных вод, Питьевая вода Лечение и сельское хозяйство

Рамона Кун 1,* , Исак Мбир Брайант ², Роберт Дженш ¹ и Йорг Бёлльманн ¹

¹ Институт экологических технологий, Бранденбургский технологический университет, Котбус / Зеңфтенберг, Котбус 03046, Германия; robert.jensch@b-tu.de (Р.Дж.); boellman@b-tu.de (ЙБ)

² Факультет экологических наук, Университет Кейп-Коста, Кейп-Кост 4P4872, Гана; ibryant@ucc.edu.gh *

Адрес для переписки: kuhn@b-tu.de

Аннотация: Сегодня нанотехнологии (НТ) прочно вошли как в частные домохозяйства, так и на коммерческие рынки. НТ находят применение в ряде секторов, таких как медицина и фармацевтика, а также в таких отраслях, как химия, электроэнергетика, производство продуктов питания, военная промышленность и другие коммерческие отрасли, благодаря их уникальным свойствам. Учитывая растущие потребности в ресурсах окружающей среды, вызванные постоянно растущим населением мира, применение НТ является чрезвычайно важной новой отраслью экологического сектора, дающей ряд преимуществ. Наш обзор представляет собой всесторонний обзор текущих событий в области восстановления окружающей среды, очистки сточных вод, очистки питьевой воды и сельского хозяйства. Более конкретно, в разделе, посвященном восстановлению окружающей среды, мы рассматриваем применение НТ для усиленного восстановления окружающей среды, удаления тяжелых металлов и ликвидации разлива нефти. В разделе, посвященном очистке сточных вод, мы освещаем разработки в области адсорбции тяжелых металлов и стойких веществ, продвинутого фотокаталитического разложения распространяемых загрязнителей сточных вод и усовершенствований процесса оседания. В разделе, посвященном очистке питьевой воды, мы обсуждаем применения для усиленной дезинфекции болезнетворных микроорганизмов, удаления тяжелых металлов, обработки мест использования и удаления органических веществ. В последнем разделе, посвященном сельскому хозяйству, мы даем обзор точного земледелия и современного состояния дел в области нанодобров, нанопестицидов, наногербицидов и нанобиосенсоров.

Ключевые слова: наночастицы; управление; Сточные Воды; питьевая вода; точное земледелие



Цитирование: Кун, Р.; Брайант, ИМ;

Йенш, Р.; Бёлльманн, Дж. Применение

экологических нанотехнологий в

реабилитации, очистке сточных

вод, очистке питьевой воды и сельском

хозяйстве. Прил. Нано 2022, 3, 54–90.

<https://doi.org/10.3390/applnano3010005>

–

Академический редактор: Иоганн Михаль Кёпер

Поступила: 13 декабря 2021 г.

Принята: 28 февраля 2022 г.

Опубликовано: 17 марта 2022 г.

Примечание издателя: MDPI сохраняет нейтралитет

в отношении заявлений об авторских правах и

опубликованных карт и институциональной принадлежности.



Копирайт: © 2022 авторов.

Лицензия MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе.

распространяется на условиях

условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/).

1. Введение

1.1. Историческое развитие и применение нанотехнологий

С одной стороны, нанотехнологии (НТ) относятся к методам наноструктурирования, таким как нанолитография и наноманипуляция, а с другой стороны, к наноматериалам (НМ). Под НМ обычно подразумевают наночастицы (НЧ), нанотрубки, нанопленки и другие. Инженерная эра НТ объединяет различные отрасли применения, включая биологические, биотехнологические, химические, медицинские, фармацевтические, пищевые и сельскохозяйственные, экологические, электронные, материаловедение и другие технологии промышленной обработки, а также другие отрасли (рис. 1). Можно сказать, что НМ представляют собой всевозможные строительные единицы на наномасштабе, от небольших групп атомов до макромолекул и наночастиц сложной структуры, обычно охватывающих диапазон размеров от 1 до 100 нм. Однако этот диапазон размеров не достаточно точен, чтобы объяснить, например, почему в последние годы некоторые традиционные материалы были заменены НМ [1]. Основные причины заключаются в том, что НТ обычно обеспечивают НМ универсальными функциональными возможностями и повышенной реакционной способностью, а также повышенной селективностью по сравнению с их объемными аналогами. Это связано с более высоким соотношением площади поверхности к объему, более высокой плотностью более высокой селективной реакционной способности.

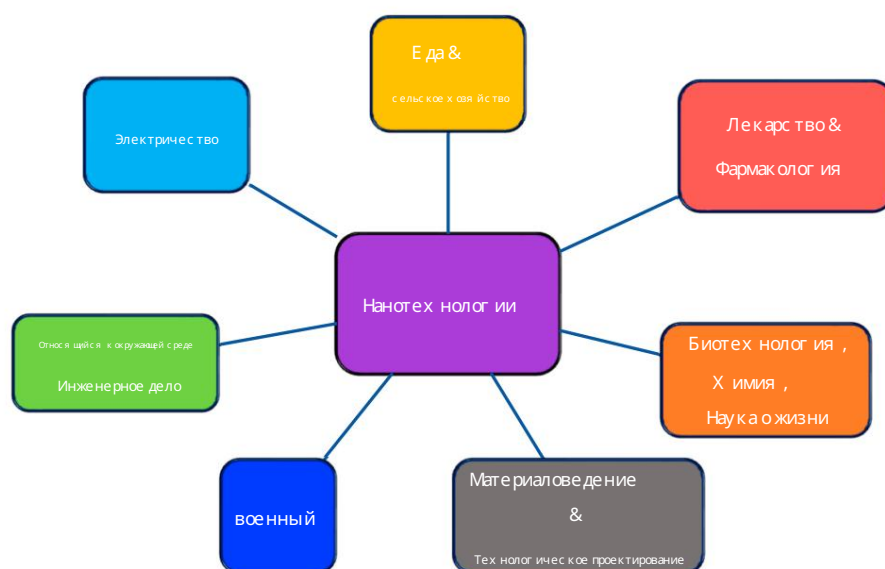


Рисунок 1. Обзор различных областей применения NT.NT.

Повышенная реакционная способность часто приводит к совершенно другим химическим свойствам по сравнению с типичными материалами, таким как повышенная дисперсия и более высокая химическая стабильность [4]. С другой стороны, к их свойствам относятся и так называемые недостатки, такие как трудности производства, как правило, в небольших количествах, что подчеркивает, что это новое поколение материалов является не только технологическим, но и экономическим и физическим аналогом. Их различные свойства можно разделить на электрические, оптические, магнитные и механические, а также на улучшенные характеристики по сравнению с их общими химическими, механическими и термическими свойствами. Примечательно, что для некоторых НМ совершенно разные аналогии. Их различные свойства можно разделить на электрические, оптические; с общими свойствами по сравнению с их общими материалами [6].

Нечеткие, модальные и вероятностные допущения, лежащие в основе построения модели, различаются. Это обусловлено отсутствием последовательных системных подходов к моделированию «всего» и «почти всего» [7]. Этот

Этот эволюционный процесс назывался «невероятным» в отношении публикаций, посвященных НТ. Е. Гло-
это было в конце 1950-х годов, когда в 1974 году, к концу его жизни, нанотехнология, разработанная лауреатом нобелевской
премии по физике Ричардом Р. Фейнманом, стала полностью реализованной [8]. По мнению Гло-
упомнул вовремя, выступления в Калифорнийском центре нанотехнологических исследований (CNA), что «внизу доста-точно
мест» [7]. Термин НТ был введен почти 25 лет спустя Эриком Дрекслером [10], описавшим
Этот эволюционный процесс назывался «невероятным» в отношении публикаций, посвященных НТ. Н «манипулирование атомами
и молекулами для создания наноструктур с помощью атомных или молекулярных «хакеров» [11].

термин «АСМ» был введен почти 25 лет спустя. Эрик ом Дрекс лером [10], опис авшим атомно-силовую микрос копию (АСМ) [12, 13]. В 1985 году Биннинг объя вил, что изобрел «манипулирование атомами и молекулами для создания структур с сложными атомными характеристиками». АСМ, и в 1986 году он был удосто ен за это Нобелевской премии. С ТМ и АСМ произвели революцию

С этой исторической точки зрения Каргозар и Мозафари [11] также подчеркивали, что визуализация и манипулирование наноразмерными объектами являющаяся с точки зрения демонстрации атомной новаторской разработки в области нанотехнологий и наномедицины, как и в STM в 1982 году, разрешение и повторная атомно-силовая микроскопия (AFM) [12] в 1985 году. Блужник абстрактно и некорректно трактовать свойства [14].

Вейнман, предсказавший движение отдельных атомов STM, и в 1986 году он был удостоен за это нобелевской премии. Революция STM и AFM. Сегодня NT прочно закрепилась в нескольких различных сегментах открытой рыночной экономики. Исследования в области визуализации и манипулирования объектами наноразмера как с помощью демонстраций. Подходы и приложения. По-прежнему открываются и открывают неожиданные двери и атомное разведение и повторная сборка отдельных атомов, создание новых, неожиданных полов. Как будто НЦ — это

х имических веществ. В начале 1990-х годов в Европе, например, в Великобритании, достигла середины. В настоящее время в Европе, например, в Великобритании, достигла середины.

Сегодня IT прочно обосновалось в нескольких различных разделах открытого рынка не только на коммерческих рынках, но и в государственных учреждениях и агентах.

Подходы и приключения, которые мы все встречаем с их открывающимися неожиданными дверями, а правительство, в частности, создало институты, в основном из-за каких-то чужих проблем.

Эти коридоры и бункеры были не только средством безопасности, от которого мы до сих пор имеем и риски для здоровья

дошедшую до середины 1990-х годов, когда были введены их выпуск из государственных предприятий (таких как нефтяная промышленность, передача энергии, ракетка, которая не только чрезвычайна легка, но и имеет высокую промышленность их импорта промышленность для производства присадок к топливу. Другие приложения нестабильны. Следовательно, НИИ продукты на их основе привлекают все больше внимания не только электронике и с светодиодами (с светодиодами) (улучшающим проводимость), но и к электронике.

на коммунда-кх, рынках, но жужа и от госудрственных учреждений и агентств. Го-промышленность и армия (например, униформа, оборудование, биологическое оружие). Между тем, в частности, правительства создали институты, в основном из-за экологических проблем и рисков для здоровья, которые становятся все более серьезной проблемой.

Сегодня область применения НТ чрезвычайно широка и охватывает коммерческие отрасли (до 1000 выпускаемых изделий), такие как нефтегазовая промышленность, передача энергии.

также весьма актуален в домашних условиях (например, косметика, солнцезащитные средства от УФ-излучения, грязеотталкивающая одежда, краски), в различных областях биомедицины (например, средства доставки лекарств, биосенсоры, устройства медицинской визуализации), а также в пищевой и сельскохозяйственной промышленности, поскольку также в экологическом секторе, включая очистку сточных вод, производство питьевой воды, восстановление почвы и подземных вод, а также датчики загрязнения воздуха [9,15]. Важность всех этих изобретений была подчеркнута в 2016 году Шведской королевской академией наук, которая наградила П. Соважа, Э. Фрейзера, С. Тоддarta и Б. Феринга в области химии за «применение молекулярных машин».

1.2. Объемы производства и классификация ЯМ

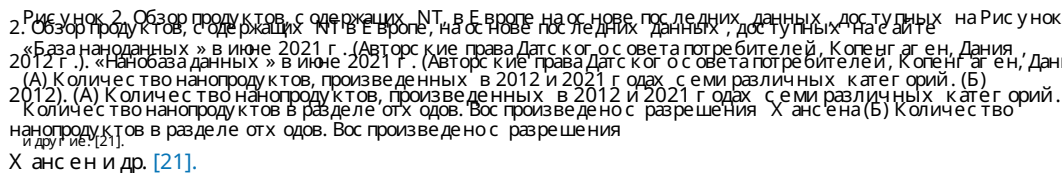
За последние два десятилетия была опубликована разнообразная информация о мировом годовом производстве. Бао и др. [16] заявляли, что производство НЧ выросло до 58 000 тонн в год. Мюллер и Новак [17] сообщили, что годовое количество производства наносеребра в 2008 году составило около 500 тонн в год. Предполагается, что в текущем 2022 году производство резко увеличится. Однако следует отметить, что в этот объем производства не включены другие ЯМ, а в основном НЧ. В целом очень сложно получить исчерпывающие данные об индивидуальных и глобальных темпах производства. Нагди и др. [18] сообщили о некоторых более подробных показателях годового производства 10 различных НМ в Европе, США, Австралии и Швейцарии. Они показали, что производство диоксида нанотитана (TiO_2), а также оксида нанозинка (ZnO) и диоксида кремния (SiO_2) является самым высоким в мире и в среднем составляет 40 000 тонн, 28 000 тонн и 55 000 тонн, соответственно.

По данным Соузи и Рибейры [19], объем производства наноматериалов в Европейском Союзе в 2016 году составил около 1 615 000 тонн. Giese et al. [20] далее оценили, основываясь на этих данных, ежегодный темп роста в 5%. Кроме того, другие ученые оценили аналогичные тенденции роста в Европе. Большая часть этой продукции выводит Европу в лидеры по производству наноматериалов (до 50%), за ней следуют США (до 40%) и Азия (до 10%) [19].

Что касается общего количества продуктов, содержащих наноматериалы, очень подробный обзор перечисленных наноматериалов предоставляется на веб-странице «База наноданных» (Датский совет потребителей) с 2012 года. Эта база данных была специально разработана для наноматериалов DTU Environment, Датский экологический совет и Датский совет потребителей, первоначально финансируемые Европейским исследовательским советом. С одной стороны, эта база данных дает краткую информацию и описание различных потребительских товаров. С другой стороны, конечный инструмент поддержки принятия решений по наноматериалам (NanoRiskCat), недавно опубликованный Hansen et al. [21] предоставляет информацию о потенциальном воздействии всех перечисленных наноматериалов и их воздействии на профессиональных конечных пользователей, потребителей и окружающую среду.

Поэтому каждому продукту присвоен цифровой код, указывающий уровень потенциального воздействия или воздействия.

В настоящее время в этой базе данных насчитывается 5325 продуктов 7 различных категорий (последнее получение данных было 7 декабря 2021 г.). На самом деле в списке представлено 162 продукта для различных применений, включая батареи, системы отопления, охлаждения и вентиляции, кухонную технику, средства для стирки и ухода за одеждой, а также 582 продукта для автомобилей, включая внешние части, техническое обслуживание, аксессуары и транспортные средства. Кроме того, в список включено 261 продукт для электроники и компьютеров, включая фотоаппараты, пленки, компьютерное оборудование, диски, мобильные устройства и средства связи; 227 продуктов питания и напитков, включая приготовление пищи, продукты питания, хранение и добавки. Кроме того, в список товаров для детей включено 84 продукта, включая игрушки и предметы первой необходимости, 3191 товар для здоровья и фитнеса, включая одежду, косметику, фильтры украшения, средства личной гигиены, спортивные товары и солнцезащитные кремы; а также 901 товар для дома и сада, включая чистящие средства, строительные материалы, предметы интерьера. За последние девять лет, то есть с 2012 по 2021 год, товары в категориях «здоровье и фитнес», товары для дома, сада и автомобилей имели самые высокие темпы производства (рис. 2А).

[illegible]

[illegible]

Наконец, можно сделать вывод, что наноматериалы составляют большую группу наноматериалов, применимых практически во всех научных и коммерческих отраслях. Кроме того, конечно, все эти различные классифицированные и классифицированные наноматериалы могут заслуживать более пристального внимания во время обзора литературы. Однако впредь этот обзор будет сосредоточен на НЧ и нанокompозитах из-за их широкого применения в реабилитации, пешном использовании в очистке сточных вод и производстве питьевой воды, а также в сельском хозяйстве.

2. Использование нанотехнологий в восстановлении окружающей среды

Среды. Применение НТ, или, лучше сказать, преимущественно НЧ, является растущей областью подходов к восстановлению окружающей среды. Однако, прежде чем более подробно обсудить многие преимущества и некоторые недостатки НТ для восстановления окружающей среды, краткий обзор традиционных подходов к восстановлению окружающей среды поможет полностью понять и рассмотреть потенциал НТ в этом конкретном экологическом секторе.

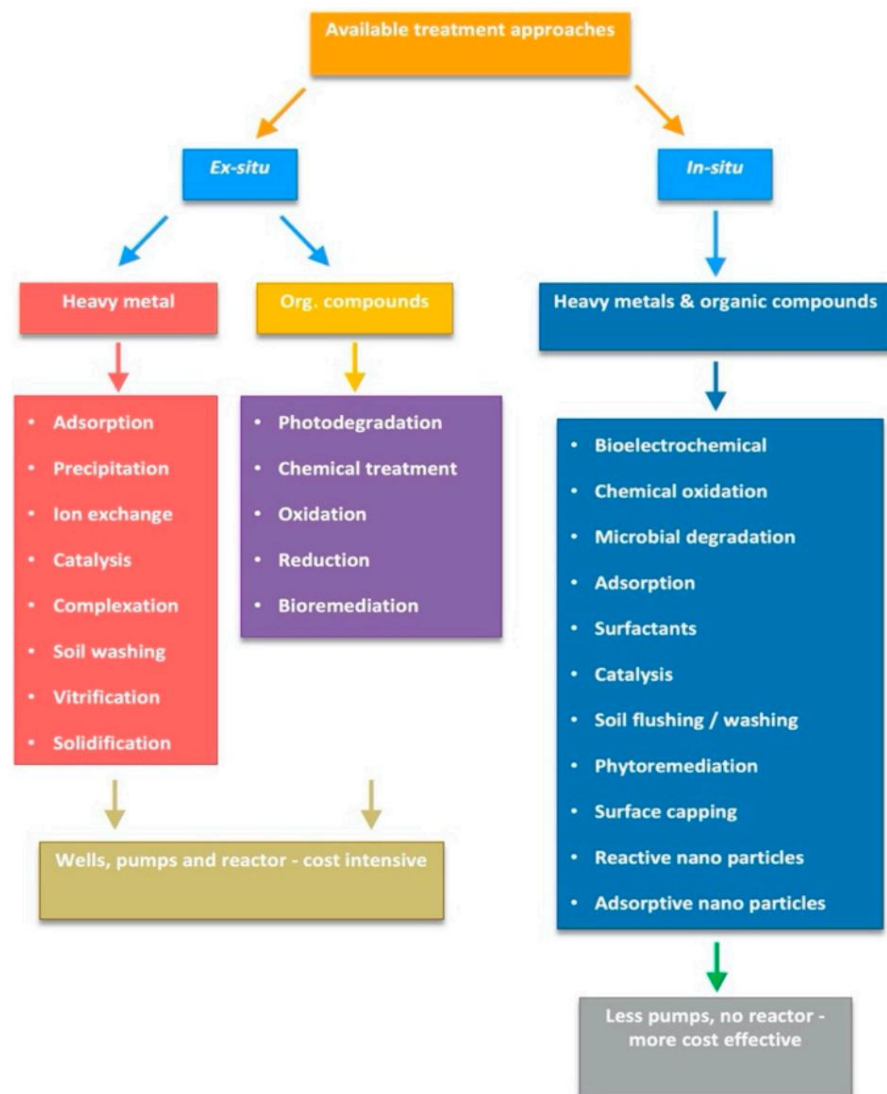
2.1. Традиционные подходы к восстановлению окружающей среды.

Восстановление окружающей среды означает обращение вспять или прекращение ущерба окружающей среде, причиненного опасными отходами. Эти загрязнения окружающей среды обычно вызваны расторителями и другими органическими веществами, такими как винилхлорид, бензол, цинк, кадмий, мышьяк, железо, ртуть, медь и нефтепродуктами, проникающими в отложения и почвы и, в конечном итоге, попадающими в грунтовые воды и водоносные горизонты. Основной вклад в загрязнение окружающей среды вносят как государственные, так и частные компании [34]. Например, в процессе добычи полезных ископаемых выделяется большое количество тяжелых металлов. Эти естественные сточные воды не всегда подвергаются надлежащей очистке перед сбросом в текущие реки [35–37]. Таким образом, загрязненные тяжелые металлы могут легко мигрировать в отложения, почвы и грунтовые воды, выступая в качестве опасных долговременных загрязнителей. Кроме того, действующие производственные предприятия, химическая и нефтяная промышленность могут вызывать загрязнение окружающей среды, выделяя органические вещества и расторители в результате утечек и неправильного обращения. Еще одним источником размещения опасных отходов являются утечки из подземных резервуаров для хранения. По данным Карна и др. [34], до 80% мест опасных загрязнителей относятся к загрязнителям подземных вод в США. Они также заявили, что это особенно важно, учитывая, что более половины населения США использует для питья подземные воды.

Затраты на восстановление, особенно грунтовых вод, очень высоки. По оценкам Американского агентства по охране окружающей среды (EPA), в 2004 году затраты на восстановление, включая строительные и пост-строительные работы, в рамках нескольких программ очистки только в США составили около 250 миллиардов долларов США [34]. Совсем недавно Мондал и др. [38] сообщили, что Агентство по охране окружающей среды США в настоящее время внесло в список более 1750 загрязненных мест опасных отходов в США, из которых только 417 были восстановлены до их пор. Однако риски опасных отходов являются распространенной проблемой не только в США, но и во всем мире [39]. Чен и Е [40], например, сообщили, что в Китае более 3,3 миллиона гектаров загрязнены с тенденцией к увеличению Хан и др. [34] заявили в своем обзоре, что во всем мире около 5 миллионов мест с опасными отходами загрязнены токсичными элементами, такими как тяжелые металлы и органические соединения из сточных вод.

Поэтому разработка экономически эффективных стратегий лечения настоятельно рекомендуется. Обычно очистка может осуществляться как *ex situ*, так и *in situ* [2]. Выбор подхода зависит от типа загрязнения (рис. 4). Например, загрязнение тяжелыми металлами можно очистить *ex situ* путем адсорбции. Этот подход более известен как «накачай и лечи». Однако органическое загрязнение можно устранить *ex situ* путем фотодеградационной химической окислительной биодеградационной. Подходы *ex-situ* представляли собой ранее разработанные стратегии очистки, при которых загрязненные грунтовые воды перекачиваются в спроектированный реактор очистки. Лечение может быть физическим, химическим и/или биологическим. Иногда требуется сочетание физических, химических и биологических методов лечения, что делает этот подход очень дорогостоящим. Кроме того, потребность в нескольких скважинах и насосах, а также в очень специфической конструкции реактора для эффективной обработки в дальнейшем

Четвертый класс методов восстановления почв делится на физические, химические и биологические. Физические методы также применимы. Физические методы восстановления почв и отложений включают: улавливание и промывка гидрофобных органических загрязнителей (т.е. использование смесяей воды и поверхностно-активных веществ) и термическая обработка от летучих органических загрязнителей (т.е. улучшение их мобильность, улетучивание и разрушение). Химические методы включают адсорбцию, ионный обмен, окисление и восстановление. Очень часто эффективно применяется активированный уголь для уменьшения содержания органических и неорганических загрязнителей в поровой воде. Биологические методы



обычно используют подачу субстрата для иницирования или усиления биоразложения. Сонг и др. [41] представили отличный обзор, более подробно описывающий эти конкретные подходы.

2.2. Восстановление окружающей среды с применением НЧ

В последние годы применение НЧ, особенно НЧ, для ремедиации стало весьма популярным. Они в основном полезны для быстрой трансформации и/или детоксикации некоторых долговременных загрязнений навалках опасных отходов из-за их более высокой скорости реакции с восстановителями. Конечно, одно из наиболее известных применений НЧ в восстановлении почвы и грунтовых вод приводит к получению наноразмерного поверхностно-модифицированного нуль-валентного железа (nZVI).

НЧ Ус пех nZVI по сравнению с обычными видами реактивного железа обусловлен его быстрой кинетикой, ограниченным воздействием на окружающую среду, нетоксичностью и экономической эффективностью [34,38,42].

В недавней литературе было опубликовано несколько исследований различных применений НЧ nZVI. Например, nZVI применялся для удаления хлорированных алифатических углеводородов [43], смеси полимолочной кислоты [44], дизельных загрязнений [45] и тяжелых металлов, таких как хром [46] и других. Хешари и др. [47] подчеркнули возможность использования наночастиц nZVI для очистки от органических загрязнителей благодаря их эффективной каталитической реакции, подобной Фентону. В присутствии кислорода НЧ nZVI производят активные формы кислорода, т.е. свободные радикалы, разлагающие органические загрязнители [48].

Хешари и др. [47] отметили, что химическое поведение участия НЧ nZVI в процессе ремедиации очень сложное, если не считать радикально-окислительных процессов химического превращения. При применении nZVI можно легко усугубить одновременные процессы, такие как адсорбция, восстановление, растворение и окисление.

Что касается деградации обычных органических загрязнителей почвы, He et al. [43] показали в своей полевой оценке, что перхлорэтилен (ГХЭ) и трихлорэтилен (ТХЭ) могут подвергаться абиотическому разложению с использованием НЧ nZVI после инъекции 682 л НЧ железа, стабилизированных карбоксиметилцеллюлозой. Они исследовали две различные инъекционные нагрузки, т.е. 0,2 г/л и 1,0 г/л с соответственно. В обоих случаях они обнаружили максимальную абиотическую деградацию ПСЕ и ТСЕ в течение двух недель после инъекции. Они пришли к выводу, что снижение кинетики разложения было результатом истощения восстановительной способности НЧ nZVI. Кроме того, они обнаружили, что инъекция с восстановителем биологическому долгому деградации *in situ*, где mZVI служил отличным донором водорода. Луна и др. [49] сообщили об аналогичном наблюдении с опытно-разработанной микроаспигмальной суспензией nZVI NP для полевых испытаний. Они получили степень удаления от 94% до 100% хлорированных алифатических углеводородов в течение одного дня после инъекции (начальная концентрация ПСЕ 3,5 мг/л). Они наблюдали за водоносным горизонтом в течение более 150 дней после закачки суспензии железа и обнаружили увеличение концентрации ПСЕ через 30 дней, восстанавливая до 50% от первоначальной концентрации. Эта концентрация ПСЕ была стабильной до конца мониторинга, то есть до 162-го дня. Они пришли к выводу, что введенная суспензия железа через три недели не только показала снижение кинетики, но и индуцировала биологическое деградирование *in situ*. Таким образом, при восстановлении хлорированных алифатических углеводородов на месте абиотическая обработка с помощью НЧ nZVI способствует и положительно стимулирует биологическую деградацию на месте в водоносных горизонтах. Таким образом, интервалы введения и количество НЧ nZVI могут быть значительно сокращены по сравнению с обычными частями железа.

Несмотря на такое полезное применение НЧ nZVI, существуют также исследования, более подробно изучающие судьбу НЧ nZVI после инъекции в отношении долгосрочных реакций. Беннетт и др. [50] показали, что nZVI со временем теряет подвижность. Они оценили перенос наноразмерных частиц nZVI на месте с консервативным индикатором с помощью двух тактичных тестов и обнаружили, что НЧ теряют подвижность со временем из-за взаимодействия между частицами и отложениями водоносного горизонта. Поэтому их распространение в водоносном горизонте может быть ограничено в некоторых породах подземных вод более низкими скоростями. По этой причине авторы рекомендовали поддерживать высокие скорости пор подземных вод во время закачки для увеличения расстояний адвективного переноса (например, через циркуляционные скважины подземных вод).

Однако транспортировка и распределение – не единственные проблемы. Возможные процессы химической трансформации НЧ nZVI после успешной реабилитации были критически исследованы. Обычно НЧ закачиваются в водоносный горизонт и остаются там. Пока что лишь немногие

исследования изучали минералогическую трансформацию Zn^{2+} при восстановлении подземных вод, вызванную агрегацией и окислением. В ходе долгосрочного исследования продолжительностью более 2,5 лет Su et al. [51] продемонстрировали, что H_2 Zn^{2+} в конечном итоге трансформировались в безвредные желтоватые пластинчатые гетитовые и ферригидритоподобные феррические частицы в верхней части водоносного горизонта. Далее они пришли к выводу, что закачка Zn^{2+} может вызвать резкие изменения биохимических параметров подземных вод, что также может способствовать восстановлению системы.

Вряд ли случаи процесса трансформации вызваны старением H_2 Zn^{2+} , что может приводить к обратным реакциям, например, при адсорбции тяжелых металлов. В частности, H_2 Zn^{2+} также применяются для удаления тяжелых металлов при реабилитации почвы и грунтовых вод из-за их быстрой кинетики адсорбции. Некоторые опасения возникли по поводу высвобождения H_2 после успешной адсорбции в течение более длительных периодов времени из-за старения. Этот процесс очень часто вызван окислением, которое может привести к попаданию в воду тяжелых металлов. Кальдерон и Фуллана [52] исследовали это явление для различных тяжелых металлов и показали, что после 21 дня контакта кадмий и никель восстановились на 65% и 27% соответственно. Непреднамеренное окисление и коррозия Zn^{2+} было вызвано наличием восстановленного окислорода, что также привело к снижению pH ниже 7,5. С понижением pH может произойти ремобилизация тяжелых металлов. Таким образом, старение H_2 Zn^{2+} может снизить эффективность удаления, являясь серьезной проблемой, которую необходимо тщательно рассмотреть перед очисткой загрязнений тяжелыми металлами в отложениях, почвах и грунтовых водах.

Другой важной проблемой, которая до сих пор ограничивает применение H_2 , в том числе Zn^{2+} , для реабилитации почвы и подземных вод является агрегация. Большинство H_2 склонны агрегировать, вследствие чего резко теряются все физико-химические свойства. Чтобы преодолеть эту серьезную проблему, в настоящее время некоторые H_2 поддерживаются такими носителями, как активный уголь, биоуголь, оксид алюминия, цеолит и различные кремнеземы [53,54].

Недавно различные нанометаллы, стабилизированные носителями, были исследованы на предмет удаления шестивалентного хрома (Cr^{6+}), который по-прежнему представляет серьезную угрозу для восстановления подземных вод. Например, Сатъя и др. [55] сообщили об использовании H_2 оксида железа, нагретых шариками альгината натрия, для удаления шестивалентного хрома (Cr^{6+}) из загрязненной воды. Они обнаружили, что эти H_2 уменьшали почти 50% Cr^{6+} при pH 7,0 в течение 15 дней, что соответствует начальной концентрации 100 ppm. Эффективность удаления дополнительно повышалась до 90% Cr^{6+} при снижении pH до 2,5. Автор пришел к выводу, что синтезированные ими H_2 высокоэффективны, экологичны и требуют лишь небольших затрат на синтез. Однако необходимо провести исследования по оценке на местах, чтобы подтвердить их потенциал для восстановления. Сообщаемые высокие скорости удаления были достигнуты в стандартизированных условиях, т.е. без конкурирующих химических реакций, которая часто резко ограничивает и/или снижает эффективность удаления. Ван и др. [56] сообщили о разработке H_2 сульфида железа (FeS), стабилизированных карбоксиметилцеллюлозой, для усиленного удаления Cr^{6+} из загрязненных грунтовых вод и насыщенной почвы. Они провели различные испытания партий и колонок, чтобы определить эффективность удаления. В ходе серийных испытаний они определили соотношение удаления 1046,1 мг Cr^{6+} на грамм H_2 FeS и отметили, что основные происходящие химические реакции включают адсорбцию восстановления и окисление.

Более того, они обнаружили существенных конкурирующих адсорбционных эффектов, вызванных природными органическими веществами. Высокая удаляющая способность была подтверждена во время испытаний колонки, когда концентрация эфлюента все еще была ниже 5 мкг/л после элюирования 45 объемов пор колонки через слой наночастиц FeS . Тем не менее, необходимо провести полевые оценки для подтверждения этих весьма многообещающих результатов.

Помимо стабилизированных H_2 новых металлов, недавно сообщалось, что биметаллические H_2 также являются перспективными кандидатами для восстановления из-за их более высокой активности в отношении адсорбции Cr^{6+} . Например, Оу и др. [57] разработали биметаллические наночастицы железа и алюминия для восстановления загрязненных Cr^{6+} подземных вод. Они определили соотношение удаления 1,47 г Cr^{6+} на грамм H_2 Fe/Al . Как Ван и др. [56] они также определили адсорбцию восстановления и окисление как основные механизмы удаления Cr^{6+} . После адсорбции восстановления Cr^{6+} вызывало высвобождение OH^- и приводило к окислению гидроксида хрома, дальнейшее перемещение которого в загрязненном водоносном горизонте было предотвращено. Биметаллические H_2

Например, Оу и др. [57] разработали биметаллические наночастицы железа и алюминия для очистки подземных вод загрязненных Cr6+. Они определили скорость удаления 1,47 г Cr6+.

на граммах НЧ Fe/Al. Как Ван и др. [56] они также определили адсорбцию восстановление и окисление как основные механизмы удаления Cr6+. После адсорбции восстановление Cr6+ вызывало высвобождение OH- и приводило к окислению гидроксидоврома, дальнейшее перемещение которых в загрязненном водном горизонте было предотвращено. Биметаллические НЧ также можно использовать для устранения токсичных красителей, как недавно предложили Gallo et al. [58]. Их также можно использовать для устранения токсичных красителей, как

разработчики биметаллические наночастицы серебра и железа для удаления красителя бромфенолового синего из водопроводной воды [59]. В [60] разработаны наночастицы серебра и железа для удаления красителя бромфенолового синего из воды. Как Оу и др. [57], разработаны наночастицы серебра и железа для удаления красителя бромфенолового синего из воды. Кроме того, [61] разработаны наночастицы серебра и железа для удаления красителя бромфенолового синего из воды.

среди. Эти несколько примеров демонстрируют широкий диапазон применения нескольких продуктов NP. Эти каналы для очистки воды и окружающей среды и для восстановления экосистем. NP наводонос восстановление окружающей среды. Они также используются для восстановления экосистем почвы, такие как океаны. Например, различные металлы и наночастицы могут быть опасны для хрупких экосистем. Потаким, как океаны. Например, [62] более 5,7 млн тонн сырой нефти было выброшено в океаны за последние четыре десятилетия. Традиционные подходы к очистке включают боновые заграждения, скиммеры и адсорбенты, поверхность которых активные вещества для поглощения, такие как активированный уголь, для удаления загрязняющих веществ из воды. Металлы, используемые для производства магнитных НЧ, обычно представляют собой железо, никель, медь, марганец, магнетит, маггемит, смешанные ферриты и другие. Роман разработки, такие как материалы с свойствами супергидрофобности и олеофильности; разработки, такие как

материалы с свойствами супергидрофобности и олеофильности. Недавно были испытаны на разливах нефти и показали улучшенные свойства поверхности, улучшены разлагаемость, непотопляемость, простота восстановления, высокая степень повторного использования, экологичность и большие скорости с поглощением [61]. Таким образом, применение магнитных НЧ дружелюбно по природе и имеет большие скорости с поглощением [61]. Таким образом, применение магнитных НЧ представляет собой альтернативный подход кбору разливов нефти из загрязненной нефтью воды. альтернативный подход кбору разливов нефти из загрязненной нефтью воды.

Подводя итог, можно констатировать, что применение НЧ при рекультивации сегодня актуально. Хотя зарекомендовал себя благодаря простоте применения, низкой стоимости и экологически чистой этикетке. Тем не менее, он хорошо зарекомендовал себя благодаря простоте применения, низкой стоимости и экологически чистой этикетке. Однако, долгосрочное воздействие на экологическое поведение с конструированных НЧ на отложениях, почве, подземные воды и морская водная экосистема по-прежнему является большой проблемой неопределенности, которая должна быть сбалансирована. Ввиду этого текущий обзор Qian et al. [62] настоятельно рекомендуется не пренебрегать. Ввиду этого текущего обзор Qian et al. [62] настоятельно рекомендуется заинтересованным читателям. В этом обзоре критически суммированы опасные последствия воздействия ЯМ на заинтересованных читателей. В этом обзоре потенциальной токсичности для наземных растений, почвенных организмов и здоровья человека. Особые преимущества и недостатки применения рекультивации с помощью NP суммированы ниже (рис. 5).

Преимущества и недостатки применения рекультивации с помощью NP суммированы ниже (рис. 5).

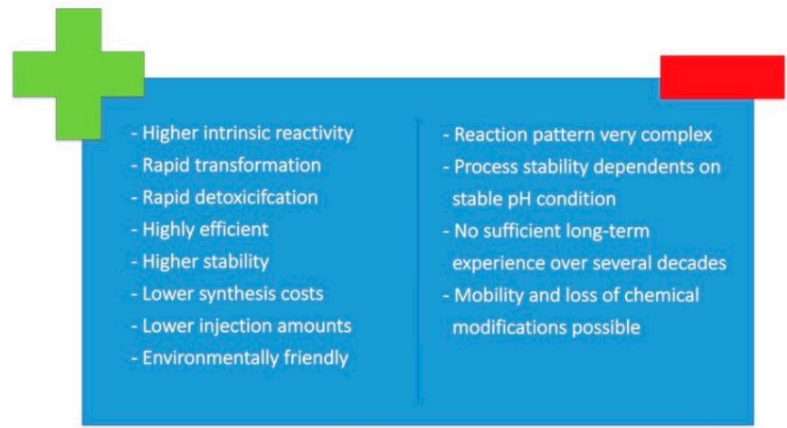


Рисунок 5. Краткое изложение преимуществ и недостатков применения NP для восстановления окружающей среды.

3. Применение НТ при очистке сточных вод

НТ и особенно НЧ также нашли широкое применение в промышленности и сектор очистки муниципальных сточных вод. Типичными источниками промышленных сточных вод являются предприятия текстильной, кожевенной, химической промышленности, а также медицинских и медицинских учреждений. фармацевтическая индустрия. При очистке городских сточных вод широкое применение. Между тем, НТ образуются посредством адсорбции, фотокаталитической деградации и частично за счет процесса мембранной фильтрации. Эти различные применения НТ в сточных водах. Лечение будет обсуждаться более подробно в следующих подразделах.

3.1. Адсорбция тяжелых металлов в качестве обычных загрязнителей сточных

вод. Адсорбция – это простой физико-химический метод, используемый для очистки вредных сточных вод от тяжелых металлов и/или органических загрязнителей. В данном конкретном случае поверхность адсорбция на твердых сорбентах происходит за счет электростатических сил. Они могут быть вызваны, например, гидроксильными группами и/или другими функциональными группами, что приводит к положительно или отрицательно заряженной поверхности сорбента. В зависимости от характера удаляемых загрязнителей применяются противоположно заряженные адсорбенты. Эффективность адсорбции характеризуется химическими взаимодействиями на поверхности адсорбентов. Основными параметрами, влияющими на адсорбцию являются pH, температура, продолжительность перемешивания (т.е. время контакта), начальная концентрация адсорбируемого вещества и дозировка адсорбента. Основными преимуществами являются высокая гибкость в эксплуатации и простая конструкция процесса (т.е. оборудования и установки), а также широкий спектр целевых загрязнителей, особенно когда в качестве адсорбента используется активированный уголь (АУ). В случае адсорбции тяжелых металлов адсорбенты, такие как АУ или биоматериалы, также могут генерироваться несколько раз, что делает этот процесс более экономически эффективным [63]. К сожалению их предпочтительная эффективность удаления не всегда может быть достигнута путем регенерации.

В традиционной адсорбции АУ применяется не только из-за его универсальности и широкого диапазона применения, но также из-за простоты химической модификации путем легирования поверхности, что приводит к более высокой селективности в отношении конкретных целевых загрязнителей. Однако переменный ток, произведенный из угля, а также натуральных материалов, таких как скорлупа кокосовых орехов и других, делает его популярным. Обычные цены, например, на удаление хрома с использованием коммерческого поглощения переменного тока могут варьироваться от 0,30 до 1,37 кг⁻¹ долларов США, что обеспечивает адсорбционную способность от 2,18 г/кг до 15,47 г/кг соответственно. Цена может легко вырасти до 20 долларов США и даже больше, если потребуются более высокие емкости адсорбции хрома до 50. Столь высокие цены на адсорбенты далеки от практичности и представляют собой ограничивающий фактор для дальнейшего коммерческого применения не только в очистке сточных вод. Таким образом, низкие адсорбционные способности при относительно высокой стоимости адсорбента заставили ученых исследовать и разрабатывать альтернативные адсорбирующие материалы, особенно в отношении удаления тяжелых металлов [63]. Помимо дальнейших разработок с использованием АУ с несколькими различными модификациями поверхности, в течение нескольких лет все большее внимание привлекают новые нанoadсорбенты. Благодаря более высокой площади поверхности к объему нанoadсорбенты могут иметь дополнительные доступные места адсорбции, более высокую реакционную способность и более сильное связывание с тяжелыми металлами.

Тем временем были разработаны различные наноматериалы, такие как графен, фуллерены, оксиды нанометаллов, такие как ZnO, Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO₂ или TiO₂, а также металлоорганические каркасы (MOF), которые показали исключительную способность к адсорбции тяжелых металлов, таких как Cr, мышьяк, кадмий, свинец, медь и другие. В Таблице 1 суммированы последние результаты, опубликованные на экспериментах по адсорбции тяжелых металлов в стандартизированных экспериментальных условиях.

Выводы и новые результаты, представленные ниже, возможно, еще не имеют прямой связи с применением сточных вод, но они демонстрируют раннюю стадию развития приложений в этой области.

Например, было исследовано, что наночастицы оксида цинка (H-ZnO) избирательно взаимодействуют с Cr³⁺ [65]. В периодических экспериментах H-ZnO продемонстрировали очень высокую селективность к Cr³⁺ при оптимальном диапазоне pH 3–7 и очень коротком времени контакта (20 мин). Стоит отметить, что автор также показал, что H-ZnO селективно адсорбируют Cr³⁺ из стоматологических сточных вод, содержащих смесь тяжелых металлов, включая Ni²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺, и Cr³⁺. Сильное связывание H-ZnO к Cr³⁺ привело к максимальной адсорбционной емкости 88,6 мг/г, что значительно выше, чем у других сорбентов, таких как AC.

Помимо Cr³⁺, удаление Cr⁶⁺ имеет более высокий приоритет, поскольку его токсичность более чем в 100 раз превышает токсичность Cr³⁺ [66]. В последние годы несколько исследователей сосредоточились на разработке различных адсорбирующих материалов на основе улучшенной адсорбционной способности по отношению к Cr⁶⁺ (таблица 1). В частности, Периясами и др. [67] сосредоточились на биокompatible адсорбенте на основе наночастиц графена для удаления Cr⁶⁺ из воды. Они достигли

адсорбционная емкость 42,64 мг / г. Они также отметили, что при кислом pH адсорбция Cr^{6+} в целом была выше, что согласуется с другими научными отчетами, подтверждающими повышенную адсорбционную емкость Cr^{6+} при кислом pH. В основном этому способствуют две причины. С одной стороны, pH влияет на поведение адсорбционной поверхности, т.е. кислый pH приводит к электронному поверхностному заряду и протонированию доминирующих видов функциональных групп. С другой стороны, диоксид хрома ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), который является доминирующей разновидностью ионов Cr^{6+} при кислом pH, приводит к более сильной адсорбции на протонированных участках поверхности, тем самым увеличивая адсорбционную емкость. Это приводит к тому, что при разработке методов восстановления необходимо учитывать пониженную адсорбционную емкость, когда обработка проводится при нейтральном pH, если только не разработаны современные адсорбирующие материалы с noticeably более высокой адсорбционной емкостью при нейтральном pH.

Периясами и др. [67] применили свой новый биокompозитный нано-оксид графена к загрязненным грунтовыми водами, собранным в близлежащей промышленной зоне, и показали, что их адсорбент полностью удаляет Cr^{6+} из воды при нейтральном pH. Этот результат примечателен, поскольку он демонстрирует применимость НЧ для восстановления грунтовых вод в качестве подходов альтернативы традиционным адсорбентам в очень низких дозах. Кроме того, авторы также заявили, что регенерация с помощью NaOH возможна, и предложили проводить допяти циклов без какой-либо значительной потери эффективности удаления биокompозита.

В целом, недавно сообщалось о нескольких новых наноадсорбентах для удаления Cr^{6+} , демонстрирующих чрезвычайно высокую адсорбционную емкость. Однако большинство из них были достигнуты при кислом pH, и читатели должны знать, как интерпретировать полученные результаты. Например, для легированных азотом магнитных углеродных нанотрубок сообщалось об адсорбционной емкости Cr^{6+} до 970,9 мг / г [68]. Тем не менее, для этой чрезвычайно высокой адсорбционной емкости требуется сильнокислый уровень pH; таким образом, требуется высокая дозировка кислот, что может привести к увеличению затрат на лечение. Осуществляется сомнительным, оправданы ли такие высокие адсорбционные емкости неблагоприятными и непрактичными условиями очистки в отношении реабилитации и конкретных стратегий очистки сточных вод. Чтотакже работы очистных сооружений, экологические проблемы и правовые нормы могут стать дополнительным препятствием для применения этих нанопоглощающих материалов для удаления Cr^{6+} .

Как и ртуть (As) также является одним из наиболее приоритетных токсичных загрязнителей, удаляемых преимущественно из сточных вод с помощью адсорбционных процессов. Доступно несколько публикаций, подчеркивающих превосходную адсорбционную емкость различных наноадсорбентов, особенно арсената (As_5^+). В сточных водах As может встречаться в виде арсенида (As_3^+) и/или арсената (As_5^+). Обе ионные формы являются канцерогенными и проявляют токсическое действие при ледовых концентрациях. По данным Шана и др. [69], первый в 20–60 раз более токсичен и его трудно удалить. Поэтому As_3^+ часто протоксифицируется и в водной среде адсорбируется за счет электростатических взаимодействий, поверхностного комплексобразования и химического взаимодействия [70]. Выбор правильного адсорбента, конечно, имеет первостепенное значение для адсорбции арсената. Сейчас известно, что некоторые адсорбенты могут восстанавливать As_5^+ до высокотоксичного As_3^+ , который часто уже адсорбируется на одном и том же адсорбенте. Сообщалось, что некоторые продукты биоугля и, особенно, нуль-валентное железо, являются восстановительными адсорбентами арсената [71,72]. Ван и др. [70] разработали НЧ трехвалентного оксидационного, обладающие более высоким родством As_5^+ , чем As_3^+ . Они сообщили о максимальной адсорбционной емкости As_5^+ 220 мг / г. Авторы заявили, что адсорбция была сильной и, следовательно, привела к необратимой адсорбции.

Баумки и др. [73] сообщили о разработке композитных нановолокон полианилин/ Fe_3O_4 для адсорбционного удаления As_3^+ и As_5^+ при нейтральном pH. Нанокompозит достиг скорости удаления почти 100% при pH от 3 до 7 как для As_3^+ , так и для As_5^+ . Кроме того, были достигнуты аналогичные максимальные адсорбционные емкости (таблица 1). Таким образом, авторы заявили, что разработанный материал может стать перспективным адсорбентом для обеспечения безопасной питьевой водой в общинах с низкими доходами. Следовательно, эта повышенная адсорбционная емкость может также привести к меньшим дозам адсорбентов, что делает этот подход более экологически чистым.

Еще одним важным тяжелым металлом, который необходимо удалить из сточных вод, является кадмий (Cd^{2+}), который добывается в горнодобывающей, целлюлозно-бумажной, красильной и многих других отраслях промышленности. Cd^{2+} очень токсичен в следовых количествах и может вызывать рак у человека, печени

и повреждение крови, и другие дисфункции. Собщаемая абсорбционная способность новых наноабсорбентов сравнительно высока и обычно колеблется от 150 мг г⁻¹ до более чем 600 мг г⁻¹. Шила и Наяка [74] сообщили о чрезвычайно высокой адсорбционной способности Cd²⁺. Они разработали наночастицы NiO, которые применимы от нейтрального до оснотного диапазона pH. Они заявили, что Cd²⁺ встречается преимущественно в виде двухвалентного катиона (Cd²⁺) при pH ниже 8,0. Они обнаружили, что при pH 6–8 адсорбция Cd²⁺ представляет собой комбинированный процесс адсорбции и осаднения металлов, который может привести к высокой скорости удаления. Далее они показали, что процесс адсорбции представляет собой преимущественно ионный обмен между катионом металла и ионами H⁺ сорбентов. Следовательно, снижение pH раствора может произойти легко, способствуя дальнейшей адсорбции, если pH находится в диапазоне от 6 до 8. Обычно более высокие адсорбционные способности могут быть достигнуты при более высоком pH, т.е. выше 10. Тем не менее, тогда осаждение может произойти. конкурирующий процесс, приводящий к образованию токсичного осадка, который необходимо удалить. Таким образом, предпочтительно проводить адсорбцию Cd²⁺ при нейтральном pH, когда осаждение не подавляет процесс адсорбции.

Читается загрязнение сточных вод, необходимо также учитывать свинец (Pb²⁺), поскольку этот тяжелый металл часто попадает в качестве примеси в кожевенной и красильной промышленности. Хуанг и др. [75] отметили, что эти сточные воды более сложны из-за существования тяжелых металлов и органических красителей. Как и большинство тяжелых металлов, Pb²⁺ также оказывает канцерогенное действие и токсичен в следовых количествах. Pb²⁺ имеет тенденцию биоаккумуляции и вызывает заболевания крови. Таким образом, эффективное удаление Pb²⁺ имеет первостепенное значение для защиты как людей, так и водных организмов. Недавно были предложены различные технологии очистки, такие как осаждение, обратный осмос, ионный обмен и поверхностная адсорбция [76]. Однако часто предпочтение отдавалось поверхностной адсорбции из-за высокой селективности и отсутствия образования вторичных загрязнителей. Недавно сообщалось о высокой адсорбционной способности Pb²⁺ для новых НЧ различных модификаций. Шила и Наяка [74] отметили адсорбционную емкость 909 мг /г Pb²⁺ на НЧ NiO. Авторы обобщали высокую селективность нового материала с войсками ионов металлов. Селективность НЧ NiO по отношению к Pb²⁺ зависит от радиуса ионов металла, атомного веса, электроотрицательности и других параметров. В своих экспериментах Шила и Наяка [74] обнаружили, что Pb²⁺ превосходит Cd²⁺; поэтому они предложили НЧ NiO для удаления Pb²⁺, предпочтительно путем адсорбции. Кроме того, Эгбосиуба и др. [77] разработали и исследовали новый материал НЧ и многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) для усиленной адсорбции нескольких тяжелых металлов, включая Pb²⁺. Они также сравнили эффективность адсорбции MWCNTs-KOH@NiNP между Pb²⁺ и Cd²⁺ и обнаружили более высокую адсорбционную способность для Pb²⁺. Как и другие, они пришли к выводу, что начальный pH является движущим фактором успешной адсорбции. С одной стороны, начальный pH влияет на депротонирование сорбентов, что способствует усилению адсорбции в поддиапазоне pH за счет уменьшения отталкивания катионов металлов (т.е. электростатических взаимодействий). Кроме того, Резания и др. [78] предложили механизм, основанный не только на электростатическом взаимодействии, но также на координации металлов и комплексообразовании, которые взаимодействуют и обеспечивают синергетические эффекты, которые приводят к усилению адсорбции и, в конечном итоге, к увеличению эффективности удаления. Координация металлов и оснотно комплексообразование сильно зависят от pH. Уровень pH также влияет на осаждение металлов. В случае Pb²⁺ осаждение гидроксида (Pb(OH)₂) начинается выше pH 6,0; таким образом, адсорбция не благоприятствует при значениях pH выше 6,0 [75]. По этой причине большинство разработанных сорбентов применяются вблизи pH 6,0. Адсорбционная способность, о которой сообщается в большинстве публикаций, находится в диапазоне от 100 мг г⁻¹ до 500 мг г⁻¹, с довольно коротким временем контакта по сравнению с другими тяжелыми металлами. Недавно в работе [79] сообщалось об успешном применении магнитных НЧ оксида железа, привитых на сверхразветвленные полимеры полиглицерина, для удаления Cu, Ni и Al из вторичных промышленных сточных вод. Были достигнуты исключительные способности адсорбции для всех трех тяжелых металлов; однако емкость по Cu была самой высокой и составила в среднем 700 мг /г. Авторы констатировали, что органические вещества оказывают негативное влияние на адсорбционную способность, однако содержание азота в сточных водах существенно снижает емкость сорбента. Тем не менее, разработ

Другим важным металлом является медь (Cu^{2+}), которая часто выбрасывается в атмосферу различными промышленными источниками, такими как гальваника, краска, отделка металла, добыча полезных ископаемых, химическое производство, производство удобрений и пестицидов, и это лишь некоторые из них [80]. Высокие дозы Cu^{2+} могут вызывать генетические нарушения печени и почек у человека. Сингх и др. [81] заявляли, что адсорбция загрязняющих веществ Cu^{2+} может быть нежелательна с обычными адсорбентами из-за проблем с утилизацией адсорбентов, содержащих металлы, высокая стоимость облуживания и трудности регенерацией. Использование магнитных НЧ как перспективное. Адсорбенты приобрели привлекательность, поскольку эти адсорбенты лучше перерабатываются за счет использования внешних магнитных полей. Таким образом, магнитные НЧ также играют важную роль в восстановлении загрязненные сточные воды. В целом адсорбционная способность была обнаружена для магнитных НЧ в диапазоне от 15 до 360 мг г^{-1} . Большинство нанoadсорбентов применялись в диапазоне pH от 6,0 до 7,0. Для большинства из них более высокие значения pH могут быть предпочтительными для депротонирования функциональных групп на адсорбирующей поверхности. Однако многие нанoadсорбенты оптимизированы для определенного диапазона pH. Между 5,0 и 6,0, поскольку Cu^{2+} начинает осаждаться в виде $\text{Cu}(\text{OH})_2$ при pH выше 6,0. Подводя итог, очевидно, что НЧ имеют большой потенциал, чтобы превзойти традиционные адсорбенты. Тем не менее, Chai et al. [63] критически отметили, что главным образом ртуть и наноразмерные оксиды металлов в настоящее время отдаются предпочтение в качестве коммерческих. Авторы аргументировали это тем, что существует лишь небольшое количество исследований, подтверждающих применение большинства нанoadсорбентов в реальных условиях. Во многих случаях большинство нанoadсорбентов демонстрируют резкое снижение эффективности с течением времени. Кроме того, риск экологического загрязнения вследствие утечек во время обработки не может быть полностью исключен, и их экологическое поведение и путь до конца не изучены. Эти аспекты могут рассматриваться внимательно; однако представленные здесь новые разработки демонстрируют прямую тенденцию к созданию НЧ для адсорбционных целей при очистке сточных вод в ближайшем будущем.

Для читателей, которых больше интересует изучение адсорбции тяжелых металлов с помощью НЧ, обзорная статья Дешпанде и др. [82] настоятельно рекомендуется. Авторы также рассмотрели применение нанотехнологий в очистке сточных вод и подчеркнул многоочисленные опубликованные статьи об успешной адсорбции тяжелых металлов, таких как кадмий, мышьяк, уран и другие.

Таблица 1. Сравнение адсорбционной способности различных наноматериалов по различным тяжелым металлам.

Цель	Адсорбирующий материал	$q_{\text{макс}}$ (мг г^{-1})	Дозировка (г л^{-1})	pH	Время контакта	Ссылка
Cr6+	Бискомпозит GO-NBP-NH ₂	300,9	0,2	2,0	360 мин.	[66]
	-TEPA n-GO@HTCS	43,87	2,0	3,0	50 мин.	[67]
	Магнитные углеродные нанотрубки, легированные азотом	970,9	2,5	1,0	<10 мин.	[68]
	Магнитные наночастицы оксида железа (м-ННЮБ)	47,62	5,3	5,0	180 мин.	[83]
	НН@NKC-900	824,4	1,0	2,0	-	[84]
	Наночастицы гидроксида алюминия	120,0	1,0	5,0	60 мин.	[85]
	Композит FeS/хитозан/биоуголь	103,9	0,2	2,0	360 мин.	[86]
As5+	ТА-нано-FeS	381,0	0,1	4,0	120 мин.	[87]
	Ультратонкие наночастицы цинка, обогащенные биоуглем Se3+	219,8	50	5,0	24 часа	[70]
	Наномасштабный композит полианилин/FeO у Fe ₂ O ₃	227,0	0,1	7,0	60 мин.	[73]
	NP, инкапсулированный микрорис тым дисоксидом кремния	248	0,4	2–6	24 часа	[88]
	Нанокompозиты оксид железа-оксид графена (Г О)	113,0	0,8	-	15 мин	[89]
	(C-n3BI@3C M-5) композитный	161,7	1,0	4,0	25 ч	[90]
	Нанокompозит Zr-MnO ₂ @восстановленный оксид графена	201,1	1,0	4,0	25 мин	[91]
Cd2+	Наночастицы NiO	625,0	0,5	6,0	10 минут	[74]
	MUNT-KOГ@ННП	415,3	0,03	5,5	30 мин	[77]
	Наночастицы окисленного окраса мала	151,7	0,05	-	90 мин	[92]
	НЧ с ульфат-гидроксидом апатита — 15BDS-HAP	457	2,0	5,0	180 мин	[93]

Таблица 1. Продолжение.

Цель	Адсорбирующий материал	q _{max} (мг г ⁻¹)	Дозировка (г л ⁻¹)	pH	Время контакта	Ссылка
Pb ²⁺	Наночастицы NiO	909	0,5	6,0	120 мин	[74]
	НЧ магнитного окремнезема, покрытые хитозаном DTPA	268,0	1,0	6,0	90 мин	[75]
	MUNT-KO ₂ @NiNP	480,0	0,03	5,5	30 мин	[77]
	Сульфид лантана NP, декорированный магнитом оксид графена	123,5	1.0	5.0	40 мин.	[78]
	Наночастицы окисленного окраса мала	182,2	0,05	-	90 мин.	[92]
Cu ²⁺	Наночастицы активированного угля /магнетита	23,6	10	-	24 часа	[94]
	Магнитные наночастицы Fe ₃ O ₄ -MnO ₂ -EDTA	105,8	0,2	6,0	60 мин	[95]
	Листы оксида графена с НЧ магнетита	16,7	1,0	7,0	24 ч	[96]
	Функционализированные наночастицы оксида графена	357,1	-	6,0–7,0	60 мин	[97]
	Наночастицы гидроксида магнетита	70,9	1,25	-	120 мин	[98]

3.2. Адсорбция стойких веществ загрязнения сточных вод через НЧ

Другое типичное применение наноадсорбентов в сточных водах приводит к удалению поли- и перфторалкильных веществ (ПФАС), представляющих собой фторорганические соединения [99]. Молекулы ПФАС содержат как гидрофильную функциональную группу (часть карбоксильную так и сульфоновую кислоту), так и гидрофобную функциональную группу в виде хвоста, который обычно фторируется. Для этой причине ПФАС могут легко образовывать мицеллы и/или мицеллы и поэтому классифицируются как амфифильные поверхностно-активные вещества с очень сильной электроотрицательностью.

Эти соединения часто применяются в качестве теплопроводителей для ковров, обивки, и специализированные поверхностно-активные вещества для текстиля во фторполимерной промышленности и в качестве важных компонентов огнетушащих пен. PFAS являются видными членами группы стойких веществ и стали основными антропогенными загрязнителями окружающей среды в последние годы. Следовательно, их быстрое и эффективное удаление, особенно если образуются сточные воды, благоприятствует адсорбции. Адсорбция ПФАС в основном обусловлена электростатическим притяжением гидрофобные взаимодействия и адсорбция, как описано Du et al. [100]. Однако на практике известно, что соединения ПФАС не существуют сами по себе, а всегда находятся в смеси органических веществ. Последнее может вызвать конкуренцию за места адсорбции. в зависимости от значения pH и температуры [101,102]. Поэтому сложно сравнивать различные адсорбенты с точки зрения их эффективности [102]. До сих пор обычные гранулированные активированный уголь использовался для удаления перфтороктансульфоновой кислоты (ПФОС) и перфтороктановой кислоты (ПФОК) из загрязненных вод [102]. Химическое равновесие, т.е. время контакта достигается только через 72 часа, что является серьезным препятствием, поскольку для удаления загрязненных ПФАС сточных вод экономически приемлемо только более короткое время реакции. Таким образом, в будущем наноадсорбенты могут вытеснить традиционные адсорбирующие материалы, не только из-за более высоких нагрузок на удаление, но и из-за более короткого времени контакта. Некоторые уже проведены разработки и исследованы темпы удаления.

Чжан и др. [99] суммировали важные разработки в области наноадсорбентов для ПФАС.

Большинство наноадсорбентов представляют собой нанотрубки на основе многослойного углерода. Как уже упоминалось выше, разные адсорбирующие способности, о которых сообщается в [89] для разных материалов, являются результатом разных ПФАС, используемых для экспериментов, разных размеров адсорбиционной поверхности материалов, разных pH и времени контакта. В результате очень сложно сравнивать эти данные. Интересно, что большинство наноадсорбентов подчиняется кинетической модели псевдоторгового порядка, что отличается от адсорбции тяжелых металлов (обычно кинетика первого порядка). Кроме того, как указано выше, независимо от того, используются ли различные новые материалы с опосредованным друг другом, все эти наноадсорбенты явно превосходят традиционные адсорбенты по времени контакта. Самое короткое время контакта для адсорбции ПФОК.

сообщили Gong et al. [103] для НЧ Fe₃O₄, с стабилизированным крахмалом, в среднем 30 мин.

Адсорбиционная емкость ПФОК составила в среднем 62,5 мг /г при pH 6,8. Таким образом, этот наноадсорбент не требует значительной корректировки pH и может легко применяться без дополнительных предварительных обработок. Однако следует иметь в виду, что конкурирующие реакции адсорбции

места на адсорбентах могут резко снизить эффективность каждого адсорбента. В этом контексте Gong et al. [103] также заявляли, что присутствие гуминовых веществ резко замедляет поглощение. Тем не менее, нанoadсорбенты для ПФАС будут прекрасной альтернативой в качестве адсорбентов. Однако необходимо провести дальнейший прототипирование исследований, чтобы лучше понять конкурирующую адсорбцию между ПФАВ и другими органическими и/или неорганическими соединениями, обычно присутствующими в сточных водах.

Еще одним очень важным применением НЧ является адсорбционное удаление красителей из текстильной промышленности и ее сточных вод. Недавно сообщалось, что некоторые красители, такие как феноловый краситель, конго красный (CR), органические красители, анионные красители, кристаллический фиолетовый, метиленовый синий (MB) и другие, успешно удаляются с помощью НЧ, таких как НЧ серебра [104], полимеров. НЧ, состоящие из полианилин-титаната цинка [101], НЧ оксида магния [105, 106], магнитно-сшитых НЧ хитозан-гликоаль/ZnO/Fe₃O₄ [107] и НЧ оксида железа [108]. Эти красители очень часто удаляются из сточных вод с помощью процесса адсорбции, когда другие подходы к очистке, такие как усовершенствованный процесс окисления (АОП), несовместимы из-за их химической устойчивости [109]. Как и в случае с ПФАС, сравнение адсорбционной способности различных NP-адсорбентов затруднено из-за разнородных химических адсорбционных поведения упомянутых красителей и разных адсорбирующих материалов. Чрезвычайно экологически чистого производства НЧ, то есть использование *Eucalyptus* spp. Было исследовано, что экстракты листьев для производства НЧ ZnO как форма процесса получения зеленых НЧ очень эффективны при удалении канцерогенных катионных и анионных красителей из сточных вод [110]. Примеры этих канцерогенных красителей включают CR и малахитовый зеленый (MG). НЧ ZnO имели высокую адсорбционную емкость: 48,3 мг/г для CR и 169,5 мг/г для MG. Благодаря легкой регенерации НЧ ZnO также пригодны для повторного использования и составляют сильную конкуренцию традиционным адсорбентам [110].

Применение НЧ при очистке сточных вод не ограничивается только сточными водами текстильной промышленности. Кроме того, загрязнители нефти относятся к группе стойких веществ и подлежат удалению с помощью нанотехнологий [111]. Сточные воды нефтепереработки содержат множество углеводородов (УВ), которые по своей природе являются свободными, растворимыми и эмульсионными. Эти УВ часто содержат желтые металлы и/или твердые частицы, что делает их опасными из-за их потенциала накопления в организме человека и окружающей среде [111]. Авторы рассмотрели технологии очистки природных экосистем и сточных вод от нефтяных загрязнителей. Примечательно, что они рассмотрели 110 углеводородных наноматериалов в качестве эффективных адсорбентов для загрязнителей нефтяного происхождения (т.е. органических загрязнителей, таких как фенолы, БТЭК и летучие органические соединения) и суммировали их наиболее важные рабочие параметры, включая материал, интересующийся более подробной информацией, настоятельно рекомендуется прочитать этот обзор.

3.3. НЧ для ускоренного фотокаталитического разложения загрязнителей сточных вод

Были предложены и изучены различные технологии удаления токсичных загрязнителей из сточных вод. Эти технологии включают ионный обмен, процессы адсорбции, мембранные процессы и АОП, включая фотодеградацию фотокатализ.

Процессы фотодеградации относятся к группе АОП. Они основаны главным образом на использовании светового излучения в качестве источника энергии. Источником света для процесса могут быть ультрафиолетовые лампы, такие как ртутные или ксеноновые лампы, светодиодные лампы или даже солнечный свет. Когда фотоны из источников световой энергии поглощаются молекулами, могут происходить как физические, так и химические изменения. Фотохимические изменения могут происходить прямым или косвенным путем. В прямых процессах энергия фотонов поглощается целевым загрязнителем, который затем подвергается гомолитическому расщеплению с образованием продуктов разложения (часто также называемых продуктами трансформации). В непрямом фотохимическом процессе энергия фотонов поглощается светочувствительным материалом, который производит такие виды, как радикалы, которые взаимодействуют с целевой молекулой, влияя на разложение загрязняющих веществ. Как косвенные, так и прямые фотохимические процессы включают ряд двустадийных и окислительных реакций. Эти процессы можно отнести к окислительно-восстановительным реакциям. В зависимости от того, инициируется ли разложение реакцией окисления или реакцией восстановления, процесс фотодеградации можно классифицировать либо как АОП, либо как процесс усовершенствованного восстановления.

Процессы фотодеградации могут осуществляться как с фотокатализаторами, так и без них. Последним можно считать «зеленой» технологией очистки сточных вод, поскольку этот механизм также может полагаться на солнечное излучение (солнечный свет) для преобразования токсичных загрязнителей в нетоксичные формы.

По сути, механизм фотокатализа заключается в преобразовании энергии фотонов в химическую энергию. Обычно это происходит в фотокатализе, т.е. между двумя или более фазами, происходит там, где катализатор находится в твердой фазе и в основном представляет собой оксиды переходных металлов на основе полупроводников. Фотокатализатор играет важную роль в создании переходного состояния, используя энергию фотонного света для редукционного поглощения и возбуждения электронно-дырочной пары (что приводит к образованию радикалов) для производства химических веществ (химической энергии) в форме продуктов. В частности, энергия адсорбированных фотонов приводит к возбуждению электронной пары в валентной зоне фотокатализатора. Валентная зона — это самый низкий энергетический уровень, заполненный электронами. Если энергия адсорбированного фотона соответствует или превышает так называемую энергию запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости (следующий энергетический уровень, не заполненный электронами), возбужденная электронная пара переходит в зону проводимости (акцептор электронов). В результате в валентной зоне на поверхности катализатора (донора электронов) возникает электронная дырка. В зоне проводимости кислород становится и образует супероксидные радикалы, а в валентной зоне окисление воды приводит к образованию гидроксильных радикалов. Энергия запрещенной зоны характерна для фотокатализаторов, которые, как упоминалось выше, очень часто являются полупроводниками. В зависимости от ширины запрещенной зоны может быть адсорбирован определенный диапазон световой энергии. Таким образом, чем шире запрещенная зона, тем меньше диапазон энергии света, т.е. возможно лишь ограниченное использование в диапазоне видимого света, и потребуются световой энергией в диапазоне УФ-излучения. Другими словами, более широкая запрещенная зона требует больше энергии фотонов для возбуждения электронной пары, которая может быть создана только фотонами ультрафиолетового света. Независимо от диапазона адсорбированного света, более широкая запрещенная зона также часто приводит к быстрой рекомбинации, снижая фотокаталитическую эффективность. Исследуются несколько модификаций поверхности посредством легирования для улучшения запрещенной зоны полупроводников в сторону узкой запрещенной зоны, м. Для читателей, которых больше интересуют эти детали, обзор Saputera et al. [112] настоятельно рекомендуется.

Полупроводниковые фотокатализаторы показали значительную эффективность по отношению к органическим и неорганическим загрязнителям. TiO_2 является одним из наиболее коммерчески эффективных фотокаталитических материалов, используемых для разложения многих органических загрязнителей, благодаря своей универсальности, простоте синтеза, хорошей управляемости и стабильности. TiO_2 обладает широкой запрещенной зоной (3,2 эВ) и адсорбирует фотоны, излучаемые вблизи УФ-диапазона, по сравнению с другими полупроводниковыми фотокатализаторами. Однако широкая запрещенная зона приводит к активации только в УФ-области и, следовательно, использует менее 5% солнечного света [113]. По этой причине использование TiO_2 в качестве фотокатализатора, активируемого солнечным излучением, нецелесообразно. Учитывая этот недостаток, многие исследователи сосредоточили внимание на получении различных структур TiO_2 , включая нанокмозаики, которые также могут помочь более эффективно разлагать токсичные загрязнители в воде и сточных водах.

Джавабакт и Мохаммадиан [114] сообщили об улучшенном удалении красителей полизоанионных прямых красителей 80 и азокатионных МВ с использованием нанофотокатализатора бентонит/ TiO_2 , иммобилизованного на HCl серебра, в различных условиях АОП (3,26 эВ) (табл. 2). Они достигли эффективности удаления до 77% для красителя прямого окрасного 80 и 100% для МВ (исходная концентрация 10 ppm) с загрузкой 0,03 г нанокмозаики с содержанием серебра 0,25% с помощью облучения УФ-светом. Авторы пришли к выводу, что такая модификация поверхности нанокмозаики привела к созданию высокоэффективного фотокатализатора, который можно использовать для очистки сточных вод азокрасителями. Кроме того, Акьюз [115] сообщил о синтезированном оксиде мультиметалла, содержащем нанокмозаику TiO_2 , наполненную HCl серебра для разложения МВ. Автор заявил, что широкая запрещенная зона TiO_2 уменьшается в присутствии оксидов переходных металлов до 2,58 эВ, увеличивая эффективность разложения. Эффективность разложения до 91% 0,3 мМ МВ (96 мг/л) была достигнута в течение 15 минут обработки. Тем не менее, для активации фотокатализатора по-прежнему требовалось облучение УФ-светом.

Несмотря на новые разработки фотокатализаторов на основе TiO_2 для УФ-фотодеградации, многообещающие разработки в области фотокаталитической деградации, опосредованной видимым светом, в последнее время привлекают все больше и больше внимания. Причина в пользу облучения видимым светом заключается в том, что УФ-обработка требует дорогостоящего оборудования и вызывает высокие энергозатраты. Вместо этого использование видимого света, который может излучать светодиодные лампы или, что еще лучше, солнечного света для фотокаталитического разложения стойких веществ, является недорогим и более экологически чистым. Кроме того, если переработка этих фотокатализаторов осуществима, эта стратегия очистки может способствовать дальнейшему совершенствованию и продвижению технологий очистки сточных вод. Некоторые многообещающие примеры более подробно представлены ниже, а более полное резюме представлено в Таблице 2.

Недавно Кани и др. в работе [116] сообщили об синтезе легированных N_4 TiO_2 , прочно внедренных на поверхность кремнеземной матрицы (SiO_2). Они исследовали шесть различных степеней легирования TiO_2 от 10 до 60 (мас. %) кремнеземной матрицы. В целом они обнаружили, что эти новые фотокатализаторы проявляют более высокую фотокаталитическую активность по отношению к фенолу и родамину В как под воздействием УФ-, так и видимого света. Интересно, что даже если эффективность удаления при УФ-обработке была все еще выше при использовании N_4 TiO_2 , внедренных в SiO_2 ($\text{TiO}_2\text{NP@SiO}_2$), обе обработки УФ- и видимым излучением привели к более высокой эффективности удаления по сравнению с обычным эталоном NP P25 TiO_2 , что примечательно. Несмотря на первоначальную обратную реакцию авторы продемонстрировали наибольшую фотокаталитическую деградацию как фенола, так и родамину В под видимым светом при использовании 10% ¹⁾ и $\text{TiO}_2\text{NP@SiO}_2$ (3,02 эВ; 390 м² г⁻¹ под УФ-светом при использовании ¹⁾. Авторы пришли к выводу 60% $\text{TiO}_2\text{NP@SiO}_2$ (3,13 эВ; 295 м² г⁻¹), что под видимым светом менее легированная поверхность SiO_2 N_4 TiO_2 приводила к лучшей адсорбции в видимом диапазоне света, но фотокаталитическая активность все же. Тем не менее, более высокая адсорбция образца 10% $\text{TiO}_2\text{NP@SiO}_2$ положительно повлияла на характеристики фотокаталитического разложения.

Кроме того, Мусаеви и Гасеми [117] сообщили о фотоактивном черном катализаторе $\text{TiO}_2/\text{CoTiO}_3$, который разлагает некоторые органические красители с значительно повышенной эффективностью в видимом свете ($\lambda = 450\text{--}650$ нм, светодиодный источник света). Они достигли почти 100%-ной эффективности разложения родамину В и MB, а также метилоранжа и тетрациклина после 60 минут воздействия видимого света. Они доказали, что все три вида радикалов $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$ и $\text{h}\nu$ играют жизненно важную роль в процессе деградации. Более того, они подчеркнули, что их нанокompозит можно перерабатывать и использовать повторно после циклов деградации красителей.

Несмотря на то, что нанокompозиты на основе TiO_2 фотодеградируют органические красители, другие материалы N_4 также разрабатываются в качестве фотокатализаторов для улучшения фотодеградации других органических соединений. Большинство новых синтезированных N_4 легируются металлами для достижения лучших характеристик деградации. Кроме того, для некоторых N_4 , таких как кобальт (Co) и оксид кобальта (Co_3O_4), сообщалось об усилении фотокаталитической активности при солнечном облучении при легировании определенных поверхностей [118]. Более подробно авторы сообщили о фотокаталитической деградации мурексидного красителя и красителя эриохрома черного-T под воздействием солнечной энергии в сточных водах с использованием наночастиц Co и Co_3O_4 соответственно. Достигнутая эффективность удаления сравнима с эффективностью оксидной, которую сообщили Cani et al. [116] для других органических соединений. Однако N_4 Co были применены к фотокаталитическому разложению мурексидного красителя и достигли эффективности разложения 43,6% при времени воздействия 40 минут под воздействием солнечного света. N_4 Co_3O_4 были применены к фотокаталитическому разложению эриохрома черного-T и достигли эффективности разложения 39,4% при времени воздействия 30 минут под воздействием солнечного света.

Дополнительные исследования сообщили о применении фотокатализаторов к другим органическим соединениям и красителям с использованием видимого света. Го и др. [119] сообщили, что фосфид меди (Cu_3P) N_4 имеет ширину запрещенной зоны 2,72 эВ и способен разлагать тетрациклин как целевой антибиотик под воздействием видимого света. Они показали, что синтезированный композит с 6% допированными N_4 Cu_3P приводит к самым высоким скоростям разложения тетрациклина до 97% (30 мг л⁻¹; 0,25 г л⁻¹ катализатора; 40 мин; облучение видимым светом), что соответствует скорости деградации в восемь раз выше по сравнению с чистым полыметрическим нитридом углерода без легирования. Авторы пришли к выводу

что усиленная фотокаталитическая деградация была не только результатом увеличения удельной площади поверхности, но и благодаря улучшенной способности улавливать падающий свет.

Для читателей, которых больше интересует фотокаталитическая деградация наноматериалов, обзоры Bethi et al. [113] и Кефени и Мамба [120] настоятельно рекомендуются. Последний рассмотрел несколько ферритовых наночастиц и нанокомпозитов относительно их использования в очистке сточных вод и возможности удаления загрязняющих веществ. Некоторые катализаторы, например $\text{CuFe}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ показали очень высокую эффективность удаления определенных красителей. Большинство из них все еще активировались ультрафиолетовым светом. Ожидается, что с учетом текущих тенденций и дальнейших исследований будут разработаны новые НЧ с оспецифическим допингом или без него, которые в основном активируются видимым светом (т.е. солнечным светом), что приведет к более экономичному и экологически безопасному дружественной фотокаталитической очистке вредных загрязнителей сточных вод.

Таблица 2. Сравнение различных нанофотокатализаторов деградации разных красителей.

Обработанный Сложный	Фотокатализатор	запрещенная зона (эВ)	Краситель (мг/л-1)	Ccat (г/л-1)	Свет Источник	Время (мин)	Эффективность (%)	Ссылка
Прямой Красный 80	Бентонит/TiO ₂ /Ag _{0,25} NiO/ CuO композит Co ₃ O ₄	3.26	10	0,6	УФ	120	77	[114]
		3,80	60	0,05	Солнце	60	67	[121]
		1,85–2,10	10	0,3	Солнце	30	78	[122]
Метиленовый синий	Бентонит/TiO ₂ /Ag _{0,25} rGO/ TiO ₂ /CdO/ZnO/Ag B-TiO ₂ /CoTiO ₃ Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ /TiO ₂	3.26	10	0,6	УФ	120	100	[114]
		2,58	96	50	УФ	15	91	[115]
		2,32/2,40	5	1	Вис	30	98	[117]
		-	30	0,25	УФ	300	100	[123]
	Композит 1% Ag-ZnO	3.02	10	0,1	Солнце	30	98,5	[124]
Метил Апельсин	B-TiO ₂ /CoTiO ₃ La _{0,75} Sr _{1,3} Co _{0,4} Наночастицы Раддлс-де-Нанопера 1% композит Ag-ZnO 30%TiO ₂ /0,3HZSM-5	2,32/2,40	5	1	Вис	60	99	[117]
		2,50	20	5	УФ	75	94	[117]
		3.02	10	0,1	Солнце	30	92	[124]
		-	10	2	УФ	150	99,5	[125]
Родамин Б	B-TiO ₂ /CoTiO ₃ 60%TiO ₂ NP@SiO ₂ 60%TiO ₂ NP@SiO ₂ Ag ₃ PO ₄ G-C ₃ N ₄ /Ag@CoWO ₄	2,32/2,40	5	1	Вис	20	99	[117]
		3,13	200	1	УФ	180	70	[116]
		3.13	200	1	Вис	180	60	[116]
		2,51	150	0,3	Вис	180	96	[126]
		2.30	100	0,1	Солнце	120	97	[127]
Фенол	10%TiO ₂ NP@SiO ₂ 10%TiO ₂ NP@SiO ₂ TiO ₂ 3,20 Mn _{0,6} Zn _{0,4} Fe ₂ O ₄ @Zn _{1-x} MnxS	3.02	200	1	УФ	180	50	[116]
		3.02	200	1	Вис	180	35	[116]
		3,20	20	1	УФ	450	90	[128]
		2,57	25	1	Вис	180	99	[129]
Мурексид	КоНП	-	50	1.0	Вис	30	43,6	[118]
Эриохром черный-Т	Co ₃ O ₄ НП Калийцинк нанокубы гексаацаноферрата Ho(OH) ₃ NP Nd ₂ Zr ₂ O ₇ НП	-	50	1.0	Вис	30	39,4	[118]
		-	10	1,5	УФ-Вид	120	76	[130]
		4,14	1	0,04	УФ	100	80	[131]
		3.30	3	0,12	УФ	50	84	[132]
Малахитовый зеленый	Калийцинк нанокубы гексаацаноферрата Композиты хитозан/Ce-ZnO Г-PZnO-НП Диатомит@Ni/NiO	-	10	1,5	УФ-Вид	120	94	[130]
		2,5	5	0,05	Вис	90	83	[133]
		3,41	10	0,2	УФ	180	89	[134]
		1,71	25	0,2	УФ	150	100	[135]

3.4. Мембранная фильтрация — нанофильтрация

Процессы мембранной фильтрации при очистке сточных вод, по-видимому, в основном ориентированы на конкретную ветвь процесса о нанофильтрации (НФ) при рассмотрении вопроса о реализации НЦ. Несмотря на то, что применение NF не очень распространено в городских сточных водах, очистка промышленных сточных вод имеет некоторые соответствующие применения для удаления микрозагрязнителей и/или других вредных соединений. NF имеет много преимуществ перед

ультрафильтрация (УФ) и обратный осмос (ОО). С одной стороны, NF обеспечивает лучшие свойства отбраковки, чем UF. С другой стороны, NF требует меньше энергии, чем RO, при почти таком же качестве пермеата [136].

Внедрение НЧ в наномембраны и/или формирование композитных мембран открыло новые химические свойства и поведение нового класса мембран. Таким образом, новые разработки и/или улучшения нанокompозитных мембран в большинстве случаев обеспечивают улучшенную очистку воды, повышенное отторжение и поток пермеата. Однако их развитие требует определения оптимальной концентрации НЧ и правильной характеристики мембраны. Обычно используются различные микроскопические методы, такие как просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия и другие. Однако анализ дзета-потенциала, описывающий заряд мембраны, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS), анализирующая химическую структуру поверхности, и инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием ослабленного полного отражения (ATR-FTIR), определяющая функциональные группы, присутствующие на поверхности мембраны, являются частотными требованиями для правильной характеристики мембраны. Таким образом, для определения оптимальных характеристик мембран необходимо несколько микроскопических анализов в сочетании с XPS, ATR-FTIR и экспериментами по фильтрации. Следовательно, разработка новых НЧ-мембран, покрытых или смешанных с НЧ, представляет собой сложную задачу и требует очень опытных ученых. В этом разделе мы суммируем лишь несколько потенциальных применений новейших недавно опубликованных разработок. Все они еще находятся на стадии науки.

Вэй и др. [136] обобщили текущие разработки в области нового тонкопленочного композита (TFC). Мембраны NF с овстроенными наночастицами, такими как TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 и другими, для NF и UF, обеспечивающие улучшенную водопроницаемость, селективность, устойчивость к загрязнению и эффективность разделения [137–139]. Тем не менее, Вэй и др. [136] также критически отметили, что на процесс полимеризации может отрицательно влиять агломерация неорганических НЧ, таких как TiO_2 , во время нанесения покрытия. Как следствие, НЧ могут образовывать неконтролируемые мембранные структуры или вызывать закупорку мембраны с снижением потока пермеата. Поэтому межфазная полимеризация мембран с НЧ является чувствительным и очень сложным процессом для производителей. Вэй и др. исследовали мембраны TFC с овстроенными ламинированными наночастицами TiO_2 . Как и другие, они определили оптимальную концентрацию НЧ, проведя эксперименты по нанофильтрации. Они показали, что концентрация НЧ TiO_2 выше 0,3 (мас./об.%) значительно увеличивает шероховатость мембраны, что приводит к снижению отторжения ионов из-за агломерации НЧ. Вместо этого использование новой мембраны TFC с оптимальной концентрацией 0,3% привело к успешному удалению лоридных и сульфатных флюксов.

Недавно Dai et al. сообщили об успешном удалении органических микрозагрязнителей и следов запаха, таких как соединения, нарушающие работу эндокринной системы, из реальных сточных вод с помощью NF-мембран, интеркалированных гидрофильными наночастицами дисульфида молибдена. [140]. Авторы разработали новые NF-мембраны, обеспечивающие гидрофильную поверхность и наноканалы в активном слое мембраны, что усиливает отторжение тестируемых микрозагрязнителей, таких как бензилпарабен и пропилпарабен. Авторы продемонстрировали, что новая мембрана обеспечивает повышенную водопроницаемость по сравнению с контрольной мембраной и усиленное отторжение микрозагрязнителей за счет подавления гидрофобного взаимодействия между поверхностью мембраны и гидрофобными соединениями, нарушающими эндокринную систему.

Удаление парабенов и других соединений, нарушающих работу эндокринной системы, из городских и промышленных сточных вод по-прежнему остается большой проблемой, поскольку они могут оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье человека. Поэтому дальнейшие разработки в области их устранения, например, с помощью усовершенствованных NF-мембран, весьма приветствуются и требуют дальнейшего развития.

Сообщалось также о разработке NF-мембран с НЧ бензоат-ферроксана для удаления красителей [141]. Как и Вэй и др. [136] авторы также установили, что увеличение количества мези НЧ в полимерной матрице мембранного материала (полиэфирсульфона) увеличивает агломерацию, что снижает поток воды. Таким образом, оптимальные условия были определены при соотношении компонентов мези НЧ до 0,25 мас.%. Новая мембрана блокирует такие красители, как Direct Red и MB, на 99% и 98,4% соответственно. Недавно сообщалось также об удалении красителя через NF-мембраны, встроены в гидрофильные графеновые квантовые точки

По мнению авторов, с интегрированной мембраной из поливинилхлорида, смешанная с квантовыми точками, привела к увеличению проницаемости и улучшению гидрофобности, что способствовало повышению проницаемости мембраны. Флукс удалось увеличить с 69% до 80%, а выброс красителя Reactive Blue 19 из сточных вод составил более 98%. Тем не менее, разработанные мембраны все еще не являются современными из-за высокой стоимости производства.

Использование НЧ ограничивается не только удалением загрязняющих веществ из сточных вод, но и восстановлением важных ресурсов, таких как фосфор [143]. Несмотря на то, что фосфор является важным ресурсом для жизни, его присутствие в сточных водах представляет собой серьезную проблему для качества воды, а именно, эвтрофикацию. Однако использование НФ вместе с НЧ золота может помочь отделить фосфат в трехвалентной форме, позволяя его моно- и двухвалентным формам проникать во время восстановления фосфата [143]. Авторы рекомендовали использовать щелочную и питательную воду для достижения высоких скоростей удаления и оптимальной проницаемости мембраны. Эти применения мембран NF, возможно, не будут предпочтительными при традиционной очистке сточных вод, но могут быть интересными подходами к очистке промышленных сточных вод с более высокими концентрациями фосфора и юридическими требованиями по восстановлению фосфора (промышленные или сельскохозяйственные сточные воды).

Халид и др. [144] сообщили о разработке новой нанофильтрационной мембраны из поливинилового спирта, покрытой наночастицами TiO_2 , обеспечивающей улучшенные противобактериальные свойства для очистки сточных вод бумажных и целлюлозных предприятий. Мембрана NF продемонстрировала превосходное удаление растворенных загрязняющих веществ и микроорганизмов. Хотя авторы сообщили о проблемах с уменьшением потока из-за закупорки пор наночастицами, качество пермеата превосходило качество пермеата обычных NF-мембран. Конечно, необходимы дальнейшие исследования для дальнейшей стабилизации этого конкретного типа мембран. Однако потенциал NF-мембран, покрытых НЧ, показывает, что НТ также нашли применение в очистке промышленных и, в некоторых случаях, городских сточных вод. Возможно, это только вопрос времени, когда реализация НФ с использованием НТ приведет к дальнейшим интересным результатам исследований.

4. Применение в производстве питьевой воды. В сфере

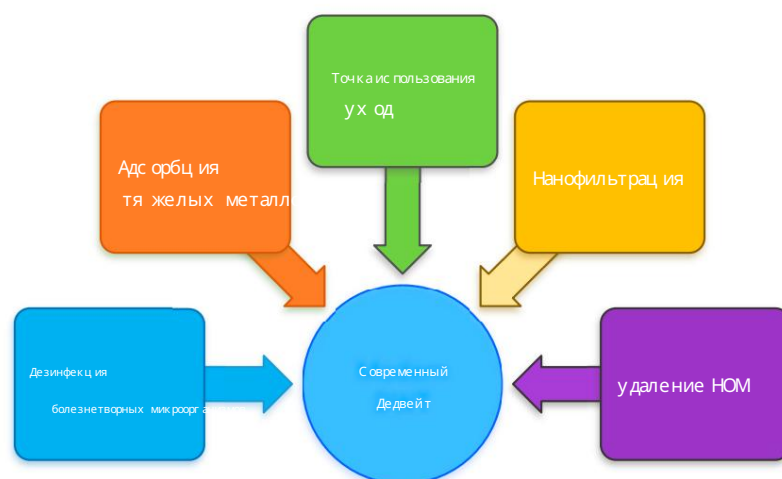
Очистка питьевой воды НТ также стала важной отраслью с растущими интересами и потенциалом для дальнейшего развития производственного процесса. Применение TiO_2 и Ag приобрело важность, поскольку была продемонстрирована замечательная антимикробная активность этих НЧ на новых металлах. Однако по сравнению с другими отраслями, использующими НТ, технологий на новых НП пока еще практически не применяются в секторе питьевого водоснабжения. Ожидается, что применение наноматериалов, особенно НЧ, также найдет дальнейшее применение в качестве передовых технологий производства питьевой воды, например, в других секторах (например, рекультивация, очистка сточных вод и сельскохозяйственно-пищевой сектор, включая упаковку). В современной очистке питьевой воды НТ может способствовать расширенной дезинфекции болезнетворных микроорганизмов, удалению желтых металлов, очистке мест использования и удалению натуральных органических материалов (NOM). Большинство применений НР при очистке питьевой воды привело к технологической дезинфекции, удалению желтых металлов главным образом посредством адсорбции, нанофильтрации и удалению/или детоксикации органических загрязнителей (рис. 6).

4.1. Усовершенствованная дезинфекция посредством применения НЧ

Дезинфекция вирусов, таких как аденовирус, норовирус, ротавирус и гепатит А, а также бактерий, таких как *Escherichia coli*, *Shigella dysenteriae*, *Salmonella typhimurium* и *Vibrio cholerae*, привлекает внимание в связи с более экологически чистыми методами лечения. Загрязнение воды вирусами и патогенами может происходить как в грунтовых, так и в поверхностных водах и требует неограниченной дезинфекции [145].

Обычно дезинфекция на станциях очистки питьевой воды (СОВ) проводится традиционным использованием хлора, озона (O_3), ультрафиолетового (УФ) облучения, диоксида хлора (ClO_2) или хлорамина (NH_2Cl) [146]. Дезинфекция хлором широко распространена, но имеет некоторые существенные недостатки. Передозировка хлора может привести к появлению типичного запаха и привкуса хлора. Однако основным препятствием для дезинфекции хлором является выделение вредных побочных продуктов дезинфекции в присутствии органических соединений [147]. В соответствии с

Прил. На 2022. 3. НА ЭКСПЕРТУЮРЕ ЦЕ НВЈУО



Альтернативно, УФ-облучение может обеспечить безопасную обработку без производства пестицидов. 4.1. Успешное применение дезинфекции за счет применения НЧ не представляет побочных продуктов. К сожалению, УФ-обработка очень энергозатратна. Дезинфекция в УФ-облучении может обеспечить безопасность, но не устраняет вирусы, ротавирус и гепатит А, что увеличивает затраты на лечение и финансирование. Также такие бактерии, как *Escherichia coli*, *Shigella dysenteriae*, *Salmonella typhimurium*, и с помощью фотокаталитического окисления. Ультрафиолетовое излучение может использоваться для дезинфекции воды, но для этого требуется высокая доза облучения. В настоящее время для дезинфекции воды используются различные методы, включая озонирование, хлорирование, кипячение, ультрафиолетовое излучение и другие. Однако, ультрафиолетовое излучение имеет ряд преимуществ перед другими методами. Во-первых, оно не оставляет никаких побочных продуктов, в отличие от хлорирования, которое может привести к образованию вредных соединений. Во-вторых, ультрафиолетовое излучение эффективно уничтожает бактерии, вирусы и простейшие организмы. В-третьих, оно не требует использования химических веществ, что снижает затраты на эксплуатацию. Однако, ультрафиолетовое излучение имеет и некоторые недостатки. Во-первых, оно требует значительных затрат энергии. Во-вторых, оно не может проникнуть в темные участки воды, поэтому для эффективной дезинфекции требуется тщательное перемешивание. В-третьих, ультрафиолетовое излучение не устраняет органические вещества, которые могут быть в воде. Поэтому, ультрафиолетовое излучение следует использовать в сочетании с другими методами очистки воды. Например, предварительная фильтрация воды для удаления взвешенных частиц, забота о низком уровне токсичности и меньшего окислительного воздействия [149]. Механизм действия TiO2 фотокатализатором является генерация АФК, особенно гидроксильных радикалов и перекиси водорода [145]. Однако Лиг и др. [145] показали, что скорость инактивации TiO2 против вирусов часто бывает очень низкой. Эффективность TiO2 можно еще больше повысить, если НЧ Ag легировать TiO2, что приведет к увеличению скорости образования гидроксильных радикалов, которые

Однако были высказаны некоторые опасения, что выщелачивание ионов серебра может повлиять на здоровье человека. Таким образом, Родригес Роза и др. [156] исследовали биодоступность коллоидного Ag и HCl Ag в фильтрах питьевой воды и обнаружили, что HCl Ag менее доступны. Определенный коэффициент опасности был ниже 1, что указывает на отсутствие риска. Меньяна-Моньяцци и др. [157] определили необходимые загрузки материала и скорости потока для системы фильтров катионная смола-серебро NP для дезинфекции питьевой воды для применения в точках использования. Они обнаружили, что уже 15 г массы кровати было достаточно, чтобы обеспечить ежедневно 15 л обеззараженной питьевой воды. Система фильтров достигла 100% степени удаления исследуемых целевых микроорганизмов. Таким образом, для обеспечения высокой чистоты и качества воды требуются лишь небольшие объемы слоя. Тем не менее, основными недостатками применения HCl Ag для обеззараживания питьевой воды являются агрегация, вымывание и неопределенное воздействие на здоровье человека и окружающую среду [18]. Следовательно, эту стратегию применения необходимо дополнительно усовершенствовать и более глубоко исследовать, решая все проблемы, упомянутые выше.

4.2. Удаление тяжелых металлов из питьевой воды HCl

Еще одним важным применением HCl в DWTP является удаление тяжелых металлов путем адсорбции, ионного обмена или мембранной фильтрации. Чтается их реализация, то первый, похуже, все еще находится в зачаточном состоянии. В целом, адсорбция тяжелых металлов хорошо изучена, и недавно сообщалось о мембранных адсорбционных процессах многих наноматериалов (см. также раздел 3.1). Их применение не ограничивается только источниками воды, но большинство разработок, похуже, сосредоточено именно в этом направлении. В целом, похуже, опубликовано меньше разработок NP для применения в питьевой воде. Поэтому мы резюмируем лишь несколько недавно опубликованных результатов. Арора [158] рассмотрел наноматериалы, в том числе HCl, для очистки питьевой воды и заявил, что большинство из них, такие как ZnO, CuO, TiO₂, Mn₃O₄ и другие, демонстрируют отличную адсорбционную способность по отношению к мышьяку, но их коммерческое производство все еще слишком дорого. Это также может быть причиной того, что адсорбционное удаление примесей мышьяка в настоящее время не очень коммерциализировано с помощью адсорбционных колонн на основе нанотехнологий для очистки грунтовых и поверхностных вод. Однако, с одной стороны, глобальный спрос на питьевую воду постоянно растет, а с другой стороны, безопасные и простые методы очистки становятся все более важными. Таким образом, дальнейшие исследования и новые разработки в области адсорбционных технологий на основе нанотехнологий могут также справиться с возросшей потребностью в воде из-за их более высокой адсорбционной способности. Пинакиду и др. [159] сообщили о разработке HCl фероксигита четырехвалентного марганца для удаления As(V) из питьевой воды. Автор заявил, что их процедура полимеризации металлоксигидроксильных цепей привела к увеличению количества мест адсорбции на HCl, тем самым, к увеличению поглощения As. Их эксперименты по адсорбции показали адсорбцию As от 2,09% до 2,49%. К сожалению Пинакиду и др. [159] не указали адсорбционную емкость с воих HCl. Другие тяжелые металлы, такие как Pb, Cd и Ni, можно легко адсорбировать с помощью HCl на основе CeO₂, Fe или Ag [160]. Однако Симеонидис и др. [161] отметили, что в реальном применении для питьевой воды адсорбция на основе наночастиц может оказаться неудачной из-за нескольких существующих помех, вызванных специфическими химическими свойствами воды. Тем не менее, они подчеркнули использование HCl магнетита для удаления Cr⁶⁺, достигнувшего адсорбционной способности 2 мг/мг из природной воды, и исследовали недорогие источники железа (FeSO₄ и Fe₂(SO₄)₃) для производства магнитных HCl и продемонстрировали, что даже при pH выше 7,5 начальная концентрация 50 мг/л Cr⁶⁺ снижалась ниже 10 мг/л в течение 5 часов. Они также подсчитали стоимость производства воих HCl и ежегодные затраты на очистку воды для каждого жителя, если их одна концентрация 50 мг/л Cr⁶⁺ составила около 3,5 евро/кг в пересчете на суше вещество и 5 евро/кг ответственно.

О продвинутой адсорбции фторидов из питьевой воды с помощью магнитных HCl также недавно сообщили различные ученые во всем мире. Загрязнение фторидом источников питьевой воды может быть вызвано промышленными предприятиями и достигать 5 мг/л [162]. Авторы разработали HCl ядро-оболочка Se-Ti@Fe₃O₄, показавшие высокую эффективность удаления фторидов с адсорбционной способностью 91 мг/г при pH 7. Авторы подчеркнули, что эти HCl показали применимость в широком диапазоне pH (от 5

до 11). Они с равнили их адсорбционные способности с 18 другими разработанными НЧ. Только НЧ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZrO}_2$, разработанные Riahi et al. [163] показали более высокую адсорбционную емкость – 158,6 мг/г. Однако такая высокая адсорбционная способность была достигнута при pH 2,5, в то время как Markeb et al. [162] работали при нейтральном pH. Что еще более важно, Markeb et al. [162] показали, что абсорбент легко восстанавливается и достигает стандартов качества питьевой воды при очистке природной воды, загрязненной фторидами.

Сочетание НЧ с мембранной технологией представляется более выгодным по сравнению с процессами адсорбции с иммобилизованными НЧ для селективного удаления тяжелых металлов.

Рой и др. [164] сообщили о мембранах нанофильтрации (НФ) с овстроенными НЧ, которые обеспечивают лучшую производительность, более высокую селективность к загрязнению обладают антимикробными свойствами и в некоторых случаях также указывают на лучшую селективность ионов. Опасения по поводу увеличения затрат на изготовление мембран можно предотвратить, используя импринтированные мембраны привитой формы, которые синтезируются из недорогих предшественников, что значительно снижает затраты. Пример успешного внедрения НЧ в микрофильтрационную мембрану для удаления As(III) недавно представили Luan et al. [165], которые достигли скорости удаления до 90% в диапазоне pH от 5,0 до 9,0.

Применение нанокompозитных мембран и, особенно, процессов нанофильтрации в производстве питьевой воды хорошо зарекомендовало себя уже более двух десятилетий.

Таким образом, мембранная технология на основе наномембран для передовых технологий очистки питьевой воды тем временем коммерциализируется, а более высокой спрос на нанокompозитные мембраны также снижает производственные затраты. Аналогичные изменения можно ожидать и в отношении адсорбции тяжелых металлов через НЧ с увеличением спроса на питьевую воду в будущем.

4.3. Удаление органических соединений из питьевой воды с помощью НЧ

Настоящее время проведено лишь несколько исследований, посвященных применению НЧ для удаления органических соединений при очистке питьевой воды. Удаление NOM в основном достигается за счет адсорбции с последующей фотокаталитической деградацией, как показано на примере НЧ TiO_2 [166]. Авторы описали оба этапа более подробно. Сначала происходит адсорбция органических соединений, что лишь снижает концентрацию загрязнителя в среде. Без УФ-облучения деградация не происходит. Облучение инициирует высвобождение АФК и других радикалов, как упоминалось выше. Они осуществляют финальную стадию разложения органических соединений, например, на поверхности TiO_2 . К сожалению, УФ-облучение часто может приводить к выделению нежелательных побочных продуктов дезинфекции, в том числе в сочетании с наночастицами TiO_2 , если время обработки слишком короткое. Гора и др. [167,168] предложили использовать наноматериалы TiO_2 линейной инженерии для удаления этих побочных продуктов.

Однако, по их оценкам, для успешного удаления потребуется в 8–36 раз больше энергии, чем требуется для обработки $\text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2$, что делает это применение на данный момент несовместимым. Дальнейшие исследования могут привести к важным улучшениям в NP при удалении NOM в будущем.

Несмотря на фотокаталитическое применение, Кумари и Гупта [169] недавно предложили использовать магнитные наноабсорбенты для удаления ароматических и гидрофобных фракций NOM из питьевой воды. Они достигли очень высоких показателей удаления – 98,7% и 91,0% для предшественников тригалометана и тригалометана соответственно. Кроме того, они продемонстрировали, что разработанный процесс сопряжения с квантовыми магнитными нанополотителями обеспечивает чрезвычайно эффективное удаление не только NOM, но и мутности. Такое одновременное удаление может привести к созданию единой системы очистки, включающей поглощение и уменьшение NOM, что также может быть реализовано с использованием недорогих материалов. Таким образом, дальнейшие исследования в этой области весьма приветствуются для продвижения одноступенчатых систем очистки с более низкими затратами на очистку и более экологически чистыми преимуществами.

Подводя итог, можно констатировать, что NT в DWTP все еще находится на ранней стадии, но уже с очень многообещающими результатами. Для более эффективного внедрения NT в качестве передовой технологии очистки питьевой воды срочно требуется дальнейшее продвижение по изучению большего количества механизмов реакции и оценке потенциального риска (включающего как человека, так и окружающую среду).

Рынок в настоящее время делят на две группы, в первую очередь, преобладают нанотехнологии, т.е. нанодоброутра, в настоящее время доминируют четыре основные области применения, т.е. нанодоброутра, нанотехнологии (для нанотехнологий), нанотехнологии (для нанотехнологий), нанотехнологии (для нанотехнологий) (рис. 7). последнее, см. раздел 2)



Тем не менее, использование нанодоброений, нанопестицидов/наногербицидов и нанобиосенсоров направлено на усиление быстрого прорастания семян, увеличение производства биомассы, улучшение удлинение корней и побегов и развитие точного земледелия (т.е. максимизация урожайности за счет моделирования) [172,174]. Используются различные НМ, такие как НЧ на основе металлов, включая Ag, TiO₂, или ZnO, магнитные НЧ, такие как оксид марганца (MnO) и оксид железа, или полимерные НЧ, такие как НМ на основе углерода или графен и другие. В следующих подразделах мы сосредоточимся на одновременном состоянии дел в области нанодоброений, нанопестицидов и наногербицидов и нанобиосенсоров для точного земледелия подробнее.

5.1. Нанодобрения в сельском хозяйстве

Нанодобрения — одно из наиболее перспективных применений НТ в сельском хозяйстве. Они включают нанокapsулы, наночастицы и вирусные капсулы; и обычно применяются для улучшения адсорбции питательных веществ путем их доставки на определенные посевные площади [170]. Основная причина дальнейшего стимулирования разработки нанодобрений кажется очевидной. Традиционное использование обычных химических удобрений приводит к высоким потерям из-за испарения и/или выщелачивания в зависимости от конкретных характеристик почвы. ДеРоза [175] заявил, что до 70% азотных удобрений теряется в окружающей среде либо в результате выщелачивания нитратов, выброса аммиака, либо в результате длительного включения в органическое вещество почвы. В целом, это может вызвать переизбыток азота, что приводит к высокому риску загрязнения почв, отложений и грунтовых вод азотом, что приводит к эвтрофикации и/или к точечному загрязнению.

Другой важной причиной потерь удобрений является быстрое высвобождение питательных веществ из удобрений в окружающую среду после их выброса. Усман и др. [174] сообщили, что потери азотных удобрений варьируются от 30 до 60%. Кроме того, потери фосфора и калия варьируются от 80–90% до 50–70% соответственно [176,177].

Таким образом, удобрения с медленным высвобождением питательных веществ являются основной целью разработки новых удобрений для улучшения доступности малодоступных питательных веществ в долгосрочной перспективе [178]. Это можно достичь путем инкапсуляции питательных веществ, при этом питательные вещества высвобождаются медленно. Снижение высвобождения питательных веществ приводит не только к снижению затрат на производство удобрений, но и к более экологически чистому способу обращения с имеющимися ограниченными ресурсами. Например, удобрения из мочевины или гидроксиапатита с нанопокрывом обеспечивают как более контролируемое выделение азота, так и резкое снижение испарения аммиака. Усман и др. [174] сообщили, что такие нанодобрения могут поддерживать стабильную скорость высвобождения по крайней мере четыре недели или дольше. В Индии биоразлагаемые полимерные наночастицы хитозана применяются в качестве медленно высвобождающихся удобрений азота, фосфора и калия [179]. Результаты были очень многообещающими, как и результаты исследований каолина и полимерных биосовместимых НЧ [180]. Преимущество использования полимерных носителей или других инкапсулированных нанодобрений приводит к быстрой адсорбции на корнях растений, что предотвращает вымывание и/или стекание. Духан и др. [181] рассмотрели очень разные подробные механизмы действия инкапсулированных нанодобрений. Они заявили, что инкапсулированный нанокремнезем также предотвращает заражение сельскохозяйственных культур бактериями и грибами. Другие инкапсулированные нанодобрения, такие как нанокремний, могут повысить устойчивость сельскохозяйственных культур, а нанодобрения на основе TiO₂ можно использовать в качестве добавок для увеличения удержания воды. Чипа [182] представил очень подробный обзор различных нанодобрений на основе наночастиц и их влияния на сельскохозяйственные культуры.

Текущие разработки также способствуют улучшению внутренних стимулов от корней к высвобождению питательных веществ, которые влияют на выработку этилена в ответ на дефицит азота и/или фосфора [174,183]. Это касается огромного количества используемых химических удобрений, новые разработки в области нанодобрений с медленным высвобождением, стимулирующих положительный рост сельскохозяйственных культур, определенно станут не только интересной областью будущего для амбициозных ученых, но и их орошо решают текущие дебаты о расходе на продовольствие в связи с постоянно растущим населением во всем мире.

5.2. Нанопестициды и наногербициды в сельском хозяйстве

Использование обычных пестицидов очень орошительно в современном сельском хозяйстве, обеспечивая в определенной степени максимальную урожайность сельскохозяйственных культур. По данным Карригера и др. [184], лишь небольшое количество применяемых пестицидов достигает цели овердителя (менее 1%), что влияет не только на пищевую цепь и здоровье человека, но и негативно влияет на окружающую среду.

Духан и др. [181] заявили, что мировое потребление пестицидов составляет около двух миллионов тонн в год. Главной недостатком использования традиционных пестицидов приводит к их глобальному опасному воздействию на окружающую среду [174]. Напротив, пестициды на основе нанотехнологий демонстрируют медленную и эффективную борьбу с вредителями в течение длительного времени [174,182]. Таким образом, их можно применять реже и в меньших количествах, что также снижает ущерб окружающей среде. Таким образом, нанопестициды также являются очень многообещающей альтернативой, поскольку они дешевле и, по-видимому, обеспечивают надежную борьбу с вредителями [181].

Как и нанодобreenия, нанопрепараты также приводят к сокращению применения и расхода, в частности, повышению урожайности сельскохозяйственных культур [174]. Следует отметить, что термин «нанопестициды» относится к составу пестицидов, который включает в себя очень мелкие частицы пестицида, активный ингредиент или другие небольшие инженерные структуры с полезными пестицидными свойствами, тогда как термин «наноформуляция» относится к рецептуре пестицидов с потенциально большей растворимостью, подвижностью и долговечностью [185,186].

Недавно сообщалось о значительном снижении токсичности для окружающей среды некоторых нанопестицидов, например, инсектицида имидаклоприда (IMI) [187] или наноформулировок перметрина [188], пестицида с несколькими атаками полиэтиленгликоля [187]. [189], мультитаток инсектицида карбофуран и фосфорорганический инсектицид ацефат [190]. Интересно, что нано-ИМИ также указывает на усиление фотодеградацию по сравнению с традиционными методами. приготовление объемного соединения. Наноацефат показал меньшую токсичность в отношении нецелевых организмов. Чипа [182] также сообщил об очень эффективной наноформуле фунгицида, тебуконазол, пестициды, валидамицин, диурон и другие.

Наноматериалы, таких как Ag [191], оксид железа [192], меди [193] и алюминия [194] сообщалось как полезные пестициды против бактериальных, грибковых и вирусных заболеваний [195]. использование инкапсулированных нанопестицидов кажется наиболее эффективным из-за их лучшего контроля и медленное высвобождение активных ингредиентов, таких как нанодобreenия. Таким образом, они могут обеспечить более точную доставку с более высокой стабильностью. Инкапсулированные нанопестициды не только обеспечивают эти свойства, но также были разработаны полимерные наносферы, наногели и нановолокна с аналогичным действием ингредиентов. Для повышения эффективности были разработаны некоторые плохоразтворимые в воде пестициды, такие как наномульсии и нанодисперсии. их биодоступность [185].

В сельском хозяйстве уничтожение сорняков является одной из самых сложных и серьезных угроз. Антенепреднамеренный высокий уровень сорняков может привести к снижению урожайности. С экономической точки зрения наличие сорняков неприятно, и его следует свести к минимуму. насколько это возможно, используя, например, обычные гербициды, такие как глифосат. Однако высокий необходимо использовать определенное количество гербицидов, хотя они аналогичны обычным пестицидам, только незначительные суммы достигают цели. По этой причине наногербициды также очень перспективны в уменьшение необходимых эффективных количеств и, следовательно, защита окружающей среды.

Большинство наногербицидов основаны на биоразлагаемых полимерных веществах, инкапсулирующих, например, например, распространённые гербициды, такие как атразин, аметрин, имазин и паракват [174,196]. С одной стороны, наногербициды обеспечивают более длительный срок службы. Кроме того, с другой стороны, они могут легко адсорбироваться растениями, где инкапсулированные вещества медленно высвобождают свои активные вещества. Для большинства из них были повышены активность и усилена защита растений. признан. Аналогичные наблюдения были зарегистрированы для наномульсии глифосата из-за повышенной биодоступности [197]. В целом, есть несколько очень многообещающих научных статей. сообщается о гербицидах нового нанотехнологий, которые проявляют более эффективную активность при более низких концентрациях по сравнению с их коммерческим составом. Кроме того, возросшая активность по снижению вводимых ресурсов приводит к значительному снижению загрязнения почвы и подземных вод. Однако, как нанодобreenия и нанопестицидов, экологические риски все еще очень неопределенны из-за отсутствия надежных аналитических методов и некоторым трудностям измерения *NM in situ*. Таким образом, некоторые предварительные результаты по биопозвоночным могут позволить судить о потенциальной риске наногербицидов [198]. На данный момент кажется, что во многих случаях наногербициды могут быть более экологически чистыми, чем их коммерческие гербициды.

5.3. Нано(био)сенсоры для точного земледелия

Точное земледелие – сравнительно молодая научная дисциплина, основанная на том, что касается NT-реализация. Общая цель точного земледелия – максимизировать урожайность сельскохозяйственных культур за счет минимизации затрат (например, удобрений, пестицидов, гербицидов) посредством мониторинга окружающей среды. переменные и применение целевых действий [181]. Клэркс и др. [199] называется точным земледелием. как умное сельское хозяйство и сельское хозяйство (оцифровка традиционного сельского хозяйства) для улучшения обоих урожайность сельскохозяйственных культур и окружающей среды.

Однако точному земледелию требуется ряд онлайн-данных, таких как плодородие, уровень влажности, температура, рост сельскохозяйственных культур, болезни, сорняки и другие, чтобы моделировать условия в реальном времени, которые помогут фермерам принимать решения о действиях [200,201]. Умное сельское хозяйство требует отличного понимания полевых условий, обрабатываемых компьютерами и последующего анализа данных, с которыми фермеры могут быть не в состоянии справиться или просто не принять [19].

Таким образом, новая идея точного земледелия включает в себя объединение компьютеров, датчиков, систем глобального спутникового позиционирования и устройств дистанционного зондирования для получения как можно большего количества достоверных онлайн-данных. Они постоянно оцениваются с помощью мощных программных инструментов для максимизации урожайности [181]. Точное земледелие обеспечивает разумное решение местных потребностей, которое в конечном итоге приведет к снижению потребления химических, затрат и ущерба окружающей среде. Очевидно, что точное земледелие в настоящее время является довольно футуристической идеей, но если принять во внимание, что с прогнозом продовольствия к 2050 году, как ожидается, увеличится на 70%, а производство с увеличится на 50%, что делает конечный точного земледелия важной ключевой отраслью завтрашнего дня [202,203].

Как NT может способствовать дальнейшему развитию точного земледелия? Наносенсоры — это умное решение, способствующее развитию ресурсов точного земледелия. В этом контексте наносенсоры применяются для быстрого обнаружения патогенов и загрязнений, препятствующих росту сельскохозяйственных культур, которые могут отрицательно повлиять на урожайность сельскохозяйственных культур. Ачарья и Пал [172] подчеркнули применение НТ в электронных устройствах, оснащенных наносенсорами, которые уже применяются для определения статуса хлорофилла отдельных сельскохозяйственных культур, указывая на состояние их здоровья. Применение таких устройств приводит к значительному сокращению использования пестицидов и других агрохимикатов, поскольку тогда можно индивидуально и/или локально применять сепциальные обработки сельскохозяйственных культур. Духан и др. [181] представили полный набор различных нано(био)сенсоров для точного земледелия. Нано(био)сенсоры, основанные на ингибировании ферментативной реакции, или другие, основанные на нанотехнологиях, применяются для обнаружения и количественного определения бактерий, вирусов и патогенов. Кроме того, датчики для точного обнаружения пестицидов (например, органофосфатов, метилпаразиона, хлорпирифоса и карбуфурата) и определения питательных веществ в почве на основе датчиков из углеродных нанотрубок или наночастиц для обнаружения газов (например, аммиака, оксида азота, сероводорода, диоксида серы и летучих веществ). Органики можно применять. Антонанчи и др. [204] подчеркнули тот факт, что нано(био)сенсоры имеют некоторые существенные преимущества по сравнению с сенсорами последнего поколения. Кроме того, они отметили, что нано(био)сенсоры демонстрируют более высокую чувствительность, более быстрое время отклика, способность обеспечивать кинетику быстрого переноса электронов (важно для ферментативных реакций), более высокую стабильность и более длительный срок службы [205]. Еще одно преимущество приводит к тому, что нано(био)сенсоры лучше применимы в сложных матрицах, таких как почвы с низкой однородностью задержанными химическими веществами, что увеличивает аналитический фоновый шум. Ожидается, что в будущем точное земледелие также приведет к разработке сельскохозяйственных роботов, оснащенных такими нано(био)сенсорами. Такие роботы могут помочь фермерам в качестве «системы поддержки принятия решений» путем выборочной роботизированной прополки. Ачарья и Пал [172] назвали это конечной целью точного земледелия. Кроме того, возможен уход за конкретными растениями, например, внесение удобрений или прополка. Мали и др. [206] углубили использование нано(био)сенсоров, назвав это «восприятием, обнаружением и мониторингом» для биохимических и биофизических сигналов, связанных с физиологическим стрессом на уровне отдельной молекулы или клетки. Как-то это может показаться надуманным, но, по словам Феймана (1960), «внизу есть много места», которое нам еще предстоит открыть, исследовать, понять и применить с уважением и ответственностью по отношению к следующим поколениям.

6. Выводы

Сектор экологических НТ все еще является молодой отраслью по сравнению с другими коммерческими секторами. Однако этот сектор начинает становиться все более открытым на мировом рынке. Как только правительство определит четкие и строгие правила и гармонизирует международные стандарты, экологические НТ будут распространяться и привлекать все больше и больше экологических рынков. Некоторые разработки НТ уже успешно применяются в восстановлении окружающей среды благодаря более высокой реакционной способности, ведущей к быстрой трансформации и/или

детоксикация мест размещения опасных отходов. Однако долгосрочные исследования покажут, оправданы ли предсказанная стабильность или неожиданные изменения условий окружающей среды повлияют на применение НЧ для восстановления окружающей среды.

При очистке сточных вод потенциал быстрого разложения загрязняющих веществ, по-прежнему, не исчерпан. Недавно была продемонстрирована адсорбция и химическая деградация промышленных красителей с использованием действия. Однако ожидается, что НТ также приведут к значительному прогрессу в устранении следов органических загрязнителей при очистке городских сточных вод. Одним из решений по удалению антропогенных загрязнителей могут быть дополнительные этапы очистки после биологической очистки с применением, например, реактивных поверхностей, допированных каталитическими НЧ.

Аналогичные события и тенденции возникают в секторе очистки питьевой воды. В настоящее время НТ в основном применяются для дезинфекции таких возбудителей, как *Escherichia coli*, *Shigella dysenteriae*, *Salmonella typhimurium* и *Vibrio cholerae*; адсорбция тяжелых металлов; и удаление органических соединений. В то время как применение для дезинфекции хорошо известно, применение для адсорбции тяжелых металлов и загрязнения органическими соединениями, по-прежнему, все еще находится в зачаточном состоянии. Однако несколько научных групп продемонстрировали, что новые применения НМ в очистке питьевой воды могут быть более экономичными и экологически безопасными по сравнению с традиционными методами очистки. Таким образом, для дальнейшего продвижения применения НЧ в этой отрасли требуется большее признание и расширение знаний.

В сельском хозяйстве применение НТ сосредоточено в основном на нанодобрениях, нанопестицидах/нанофунгицидах и нанобактериоцидах. Как указывалось ранее, разработка и внедрение НТ в этом секторе, по-прежнему, в значительной степени зависят от международных правил и точных оценок рисков. Существует огромный потенциал применения НТ в сельском хозяйстве, особенно в сфере точного земледелия.

Междисциплинарные исследования срочно необходимы для дальнейшего развития в этой области из-за растущего спроса на продукты питания и другие товары. По мере продолжения развития, т.е. увеличения численности населения планеты, человечество столкнется с некоторыми актуальными проблемами, обеспечивающими доступ к достаточному количеству продуктов питания, питьевой воде, санитарным услугам и медицинскому обслуживанию выходящих за стандарты. Высокие потребности в производстве продуктов питания автоматически приведут к стимулированию внедрения НТ в сельском хозяйстве из-за сокращения потребления удобрений, пестицидов и т.д.; в части доставки воды при необходимости; а также в части оптимизации распределения водных ресурсов с учетом сезонных изменений и других. Мы надеемся, что все эти оптимизации приведут к увеличению урожайности сельскохозяйственных культур и уменьшению ущерба окружающей среде.

Вклад авторов: Концептуализация, РК; письмо — подготовка оригинального проекта, РК; написание — рецензирование и редактирование, РК, ММБ и ЖБ; визуализация, Р.К. и Р.Дж. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования.

Общее заявление институционального рецензента: Неприменимо.

Заявление об информированном согласии: Неприменимо.

Заявление о доступности данных: данные, подтверждающие выводы этого обзора, доступны по запросу у соответствующего автора.

Благодарности: Авторы благодарят разработчика базы наноданных за разрешение использовать их данные для визуализации.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Бхаттачарья, Д.; Сингх, С.; Сатталика, Н.; Хандельвал, А.; Чон, С.Х. Нанотехнологии, Большие вещи из крошечного мира: обзор. *Межд. J. u-e-Serv. наук. Тех. нол.* 2009, 2, 28–29.
2. Тратник, П.Г.; Джонсон Р.Л. Нанотехнологии для очистки окружающей среды. *Нано Сегодня* 2006, 1, 44–48. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
3. Сан, Х. Большие проблемы экологических нанотехнологий. *Передний. Нанотехнологии.* 2019, 1, 2. [\[CrossRef\]](#)

4. Франко, Калифорния ; Забала, Р.; Кортес, ФБ. Нанотехнологии применяются для повышения продуктивности нефти и газа добычи колумбийских месторождений. Дж. Пет. наук. англ. 2017, 157, 39–55. [\[Перекрестная ссылка\]](#) 5.
- Салех, Т.А. Наноматериалы: классификация, свойства и токсичность для окружающей среды. Окружающая среда. Тех. нол. Иннов. 2020, 20, 101067. [\[CrossRef\]](#)
6. Регорчик, К.; Кнез, М. Гибридные наноматериалы посредством молекулярных и атомных слоев: с верху вниз, снизу вверх и промежуточные подходы к новым материалам. Прогр. Матер. наук. 2016, 75, 1–37. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
7. Фейнман Р. Внизу достаточно места (перепечатка речи, произнесенной на ежегодном собрании Американского физического общества). англ. наук. 1960, 23, 22–36.
8. Калипинар, Х.; Улас, Д. Развитие нанотехнологий в мире и стандарты нанотехнологий в Турции. Процессия Компьютер. наук. 2019, 158, 1011–1018. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
9. Гленн, Дж. К. Нанотехнологии: Будущее соображения охранны окружающей среды в военной сфере. Тех. нол. Прогр. нов. Соц. Ч. англ. 2006, 73, 128–137. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
10. Дрекслер, Э.К. Машины созидания: грядущая эра нанотехнологий; Якорные книги; Даблдей: Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 1986 г.; ISBN 0-385-19973-2.
11. Каргозар С.; Мозафари, М. Нанотехнологии и наномедицина начинают с малого, думайте масштабно. Матер. Сегодня. Проц. 2018, 5, 15492–15500. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
12. Биннинг, Г.; Рорер, Х. Сканирующая туннельная микроскопия. Серфинг. наук. 1983, 126, 236–244. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
13. Биннинг, Г.; Quate, CF; Гербер, К. Атомно-силовой микроскоп. Физ. Преподаватель. Летт. 1986, 56, 930–933. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Шаминг, Д.; Ремита, Х. Нанотехнологии: С древнейших времен до наших дней. Найденный. хим. 2015, 17, 187–205. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
15. Фэйрбрэзер, А.; Фэйрбрэзер, младший. Соответствуют ли экологические нормы инновациям? Пример использования нанотехнологий промышленности. Экологический. Окружающая среда. Саф. 2009, 72, 1327–1330. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Бао, Ю. Он, Дж.; Сонг, К.; Го, Дж.; Чжоу, Х.; Лю С. Синтез металлических наночастиц, опосредованный растительными экстрактами. Дж. Х. им. 2021, 2021, 6562687. [\[CrossRef\]](#)
17. Мюллер, Северная Каролина; Новак, Б. Моделирование воздействия инженерных наночастиц в окружающую среду. Окружающая среда. наук. Тех. нол. 2008, 42, 4447–4453. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Нагди, М.; Метакни, С.; Уарда, Ю. Барр, С.К.; Дас, Р.К.; Кледон, М. Инструментальный подход к пониманию нанозагрязняющих веществ. Нанотехнологии. Окружающая среда. англ. 2017, 2, 3. [\[CrossRef\]](#)
19. Соуза, В.С.; Тейшейра, М.Р. Сконструированные наночастицы на основе металлов в системах очистки питьевой воды: критический обзор. наук. Тотальная среда. 2020, 707, 136077. [\[CrossRef\]](#)
20. Гизе, Б.; Класиг, Ф.; Парк, Б.; Каег, Р.; Стейнфельдт, М.; Виггер, Х.; Фонглия, А.; Готшалк, Ф. Риски, выбросы и концентрация инженерных наноматериалов в окружающей среде. наук. Отчет 2018, 8, 1565. [\[CrossRef\]](#)
21. Хансен, Сан-Франциско; Баун, А.; Альс-труг-Йенсен, К. NanoRiskCat — контекстуальный инструмент поддержки принятия решений для наноматериалов; Датское агентство по охране окружающей среды: Копенгаген, Дания, 2011 г.; стр. 1–86.
22. Шейх-опеслами, М.; Ганджи, Д. Конвективный теплообмен наножидкостями с использованием полуаналитических и численных подходов: обзор. Дж. Тайваньский институт. хим. англ. 2016, 65, 43–77. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
23. Шбель Дж.; Бургард, М.; Хилс, К.; Дерш, Р.; Далле, М.; Волк, К.; Карг, М.; Рейнер, А.; Шальц, Х. Встреча снизу вверх и сверху вниз: неоднородные гибридные нетканые материалы как эффективная платформа катализа. Энджьюхим. Межд. Эд. 2016, 56, 405–408. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Арройо, Г.; Ангуло, Ю. Дебю, А.; Кумбал, Л.Х. Синтез их характеристика наночастиц серебра, полученных с экстрактом плодов карраскильи (Berberis Hallii), и оценка его фотокаталитической активности. Катализаторы 2021, 11, 1195. [\[CrossRef\]](#)
25. Кумар, Б. Грин. Синтез наночастиц золота, серебра и железа для разложения органических загрязнителей в сточных водах. Дж. Компос. наук. 2021, 5, 219. [\[CrossRef\]](#)
26. Эдисон, Т.Н. Дж.; Сетураман, М. Мгновенный зеленый синтез наночастиц серебра с использованием экстракта плодов Terminalia chebula и оценка его каталитической активности по восстановлению метилового синего. О. Проц. Биохим. 2012, 47, 1351–1357. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
27. Сингх, Р.; Ким, Ю. Дж.; Чжан, Д.; Ян, округ Колумбия. Биологический синтез наночастиц из растений и микроорганизмов. Тенденции Биотехнология. 2016, 34, 588–599. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Иравани, С.; Корбеканди, Х.; Мирмохаммади, С.В.; Золфар, Б. Синтез наночастиц серебра химический, физический и биологические методы. Рез. Фарм. наук. 2014, 9, 385–406. [\[PubMed\]](#)
29. Мишра, С.; Прадхан, Дж.; Сингх, Р.; Кумар, Б. Фитосинтез наночастиц оксида железа с использованием экстракта побегов Juncus inflexus. Биointerфейс. Рес. Прил. хим. 2021, 12, 3790–3799. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
30. Ильяс, М.; Варис, А.; Хан, Австралия; Замель, Д.; Яр, Л.; Басет, А.; Мухаймин, А.; Хан, С.; Али, А.; Ахмад А. Биологический синтез наночастиц диоксида титана из растений и микроорганизмов и их потенциальное биомедицинское применение. Неорг. хим. Коммун. 2021, 133, 108968. [\[CrossRef\]](#)
31. Ралия, Р.; Бисвас, П.; Тарафдар, Дж. Биосинтез наночастиц TiO₂ и его физиологическое воздействие на маш (Vigna radiata L.). Биотехнология. Респ. 2015, 5, 22–26. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
32. Джаясилан, К.; Ракуман, А.А.; Рупан, С.М.; Кирти, А.В.; Венкатесан, Дж.; Ким, С.-К.; Ияпан, М.; Сива, К. Биологический подход к синтезу наночастиц TiO₂ с использованием Aeromonas Hydrophila и ее антибактериальной активности. Спектрхим. Acta Part A Мол. Биомол. Спектроск. 2013, 107, 82–89. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
33. Чен, Г.; Ли, М.; Ли, Ф.; Солнце, С.; Ся, Д. Белково-опосредованный синтез наноструктурированного титана с различными полиморфами в комнатных условиях. Температура. Adv. Матер. 2010, 22, 1258–1262. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)

34. Карн, Б.; Куикен, Т.; Отто, М. Нанотехнологии и восстановление на месте: обзор преимуществ и потенциальных рисков. Окружающая среда. Перспектива здоровья . 2009, 117, 1813–1831. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
35. Ма, Т.; Шэн, Ю; Мэн, Ю; Сан, Дж. Многоэтапная очистка речных отложений, загрязненных тяжёлыми металлами, в горнодобывающем регионе по размеру частиц. Химосфера 2019, 225, 83–92. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Лин, Ю; Мэн, Ф.; Ду, Ю; Тан, Ю. Распространение, видообразование и оценка экологического риска катящих желтых металлов в поверхностных отложениях залива Цзяочжоу, Китай. Хим. Экол. Оценка рисков. Межд. Дж. 2016, 22, 1253–1267. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
37. Вильянуэва, У.; Рапоса, Дж. К.; Мадригал, Дж. М. Новый методологический подход к оценке подвижности As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni и Pb в речных отложениях. Микрохим. Дж. 2013, 106, 107–120. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
38. Мондал, А.; Дубей, Б.К.; Арора, М.; Мамфорд, К. Перенос наночастиц железа в пористых средах для восстановления территорий: обзор исследований колонок в лабораторных масштабах, моделирования переноса и применения в полевых условиях. Дж. Хазард. Матер. 2021, 403, 123443. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. Хуан, Ю; Ван, Л.; Ван, В.; Ли, Т.; Он, З.; Ян, Х. Текущее состояние загрязнения сельско-хозяйственных почв тяжёлыми металлами в Китае: Метаанализ. науч. Тотальная среда. 2019, 651, 3034–3042. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
40. Чен, Р.; Йе, К. Решение проблемы загрязнения почвы в Китае. Природа 2014, 505, 483. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
41. Песня, Б.; Цзэн, Г.; Гонг, Дж.; Лян, Дж.; Сюй, П.; Лю, З.; Чжан, Ю; Чжан, К.; Ченг, М.; Лю, Ю; и другие. Методы оценки эффективности рекультивации почв и осадков на месте, загрязнённых органическими загрязнителями и тяжёлыми металлами. Окружающая среда. Межд. 2017, 105, 43–55. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
42. Чжао, Х.; Лю, В.; Кай, З.; Хан, Б.; Цань, Т.; Чжао, Д. Обзор приготвления и применения стабилизированных наночастиц нульвалентного железа для восстановления почвы и грунтовых вод. Вода Рес. 2016, 100, 245–266. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
43. Он, Ф.; Чжао, Д.; Пол, К. Полевая оценка наночастиц железа, стабилизированных карбоксиметилцеллюлозой, для разрушения на месте хлорированных растворителей в зонах источников. Вода Рес. 2010, 44, 2360–2370. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
44. Панди, К.; Саха, С. Микроинкапсулированные наночастицы нульвалентного железа в матрице полимолочной кислоты для восстановления на месте загрязнённая вода. Дж. Энвайрон. хим. 2020, 8, 103909. [\[CrossRef\]](#)
45. Картик, А.; Рой, Б.; Аггатаппа, И., П. Сравнение пен-алкилполигидрокси-фосфата с нульвалентным железом и оксидом железа, стабилизированных наночастицами, для восстановления почв, загрязнённых дизельным топливом. Дж. Энвайрон. Менеджер. 2019, 240, 93–107. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Барагано, Д.; Алонс, О; Дж.; Гальего, младший; Лобо, МС; Гиль-Диас, М. Нулевалентное железо и наночастицы гетит как новые перспективы методов рекультивации почв, загрязнённых мышьяком. Химосфера 2020, 238, 124624. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
47. Хещар, Р.; Берендия, Н.А.; Гандхи, Н.; Тагизаде, С.-М.; Малеки, М.; Тагизаде, С.; Гасеми, Ю; Эбрахими, А. Методология реагирования поверхности и оптимизация реакции на получение наночастиц нульвалентного железа для очистки от органических загрязнителей. Биокатаг. Сельскохозяйственное биотехнология . 2019, 21, 101329. [\[CrossRef\]](#)
48. Резаи, Ф.; Вилоне, Д. Влияние pH на эффективность нульвалентного железа в гетерогенных фентоновых и фентоноподобных процессах: обзор. Молекулы 2018, 23, 3127. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
49. Луна, М.; Гастон, Ф.; Тоско, Т.; Сетхи, Р.; Велимирович, М.; Гемметс, Дж.; Мойшондт, Р.; Сагюн, Х.; Клаас, Н.; Бастиянс, Л. Заканка под давлением микромасштабно нульвалентного железа, стабилизированного гуаровой камедью для восстановления грунтовых вод. Дж. Контам. Гидрол. 2015, 181, 46–58. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
50. Беннетт, П.; Он, Ф.; Чжао, Д.; Эйкен, Б.; Фельдман, Л. Испытание на месте подвижности и реакционной способности наночастиц металлических железа на мелководье. гранулированный водонепроницаемый горизонт. Дж. Контам. Гидрол. 2010, 116, 35–46. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
51. Су, К.; Пулс, Р.В.; Круг, Т.А.; Уотлинг, Монтана; О'Хара, С.К.; Куинн, Дж.В.; Руис, Н.Е. Расстояние перемещения и трансформация введенных в недра эмульгированных наночастиц нульвалентного железа в течение двух с половиной лет. Вода Рес. 2013, 47, 4095–4106. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
52. Кальдерон, Б.; Фуллана, А. Выброс тяжёлых металлов из-за эффекта старения при восстановлении наночастиц нульвалентного железа. Вода Рес. 2015, 83, 1–9. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
53. Инь, З.; Песня, Л.; Сонг, Х.; Хуэй, К.; Лин, З.; Ван, К.; Сюань, Л.; Ван, З.; Гао, В. Очистка загрязнённых медью отложений с помощью наночастиц диоксида титана на основе гранулированного активированного угля: исследование механизмов и влияние на активность ферментов. науч. Тотальная среда. 2020, 741, 139962. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
54. Миаралипур, С.; Фридманн, Д.; Скотт, Дж.; Амаль, Р. TiO₂/пористые адсорбенты: последние достижения и новые применения. Дж. Хазард. Матер. 2018, 341, 404–423. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
55. Сатья, С.; Рагул, В.; Вирагаван, вице-президент; Сингх, Л.; Ахмед, МИН. Исследование in vitro по восстановлению шестивалентного хрома [Cr(VI)] с использованием шариков на основе наночастиц оксида железа. Окружающая среда. Нанотехнологии. Монит. Менеджер. 2020, 14, 100333. [\[CrossRef\]](#)
56. Ван, Т.; Лю, Ю; Ван, Дж.; Ван, Х.; Лю, Б.; Ван, Ю. Восстановление на месте загрязнённых шестивалентным хромом грунтовых вод и насыщенной почвы с использованием стабилизированных наночастиц сульфида железа. Дж. Энвайрон. Менеджер. 2019, 231, 679–686. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
57. Оу, Ж.-Х.; Шен, Ю.-Т.; Цанг, Д.; Сан, Ю. Дж.; Као, К.-М. Применение системы биметаллических наночастиц железа/алюминия для очистки загрязнённых грунтовых вод. Химосфера 2020, 256, 127158. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
58. Галло, А.; Бьянко, К.; Тоско, Т.; Тирафери, А.; Сетхи, Р. Синтез экологически совместимых биметаллических наночастиц серебра/железа для очистки воды и оценки реакционной способности бромфенового синего. Дж. Чистый. Прод. 2019, 211, 1367–1374. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
59. Сингх, Х.; Бхардвадж, Н.; Арья, С.К.; Атри, М. Воздействие разливов нефти на окружающую среду и их устранение с помощью магнитных наноматериалов. Окружающая среда. Нанотехнологии. Монит. Менеджер. 2020, 14, 100305. [\[CrossRef\]](#)
60. Дэйв, Д.; Гали, А. Технологический анализ и разливов нефти на море: критический обзор и сравнительный анализ. Являющийся. Дж. Энвайрон. науч. 2011, 7, 423–440. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

61. Доши, Б.; Силланпяя, М.; Каллиола С. Обзор биологических материалов для ликвидации или разлива нефти. *Вода Рес.* 2018, 135, 262–277. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПбМед\]](#)
62. Цинь, К.; Чен, М.; Лин, С. Нанотехнологии в восстановлении почв – применение и последствия. *Экотоксикол. Окружающая среда. С.* 2020, 201, 110815. [\[CrossRef\]](#) [\[ПбМед\]](#)
63. Чай, В.С.; Чен, Ю.; Кумар, Р.; Мубашир, М.; Маджид, З.; Банат, Ф.; Хо, С.-Х.; Шыу, Польша. Обзор традиционных и новых материалов для адсорбции тяжелых металлов при очистке сточных вод. *Дж. Чистый. Прод.* 2021, 296, 126589. [\[CrossRef\]](#)
64. Бабель, С.; Курниаван, Т.А. Удаление Cr(VI) из синтетических сточных вод с использованием древесного угля из скорлупы кокосового ореха и коммерческого активированного угля, модифицированного окислителем и/или итиозаном. *Химосфера* 2004, 54, 951–967. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПбМед\]](#)
65. Гу, М.; Хао, Л.; Ван, Ю.; Ли, Х.; Чен, Ю.; Ли, В.; Цзян, Л. Селективная адсорбция ионов тяжелых металлов наночастицами оксида цинка из стоматологических сточных вод. *Хим. Физ.* 2020, 534, 110750. [\[CrossRef\]](#)
66. Конг, Кью Вэй, Дж.; Ху, Ю. Вэй, К. Изготовление модифицированного оксидом графена полимера с осевыми разветвленными концевыми аминополимерами и его выдающиеся характеристики адсорбции по отношению к Cr(VI). *Дж. Хазард. Матер.* 2019, 363, 161–169. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПбМед\]](#)
67. Периясами, С.; Манивасакан, П.; Джияпрабха, К.; Минакши, С.; Висванатан, Н. Изготовление биокмпозита гидротальцита/хитозаном с использованием оксидного графена: эффективный адсорбент для удаления хрома из воды. *Межд. Ж. Биол. Макромол.* 2019, 132, 1068–1078. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПбМед\]](#)
68. Хуанг, Дж.; Цао, Ю.; Цинь, Б.; Чжун, Г.; Чжан, Дж.; ЮХ.; Ван, Х.; Гэн, Ф. Высокоэффективные и устойчивые к кислотной коррозии магнитно-углеродные нанотрубки, легированные азотом, для удаления шестивалентного хрома с последующим повторным использованием. *Хим. Анг. Л. Дж.* 2019, 361, 547–558. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
69. Шан, К.; Лю, Ю.; Хуанг, Ю.; Пан, Б. Нерадикальный путь доминирует в каталитическом окислении As(III) с теометрической H₂O₂ над наночерия. *Окружающая среда. Межд.* 2019, 124, 393–399. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПбМед\]](#)
70. Ван, Ю.; Чен, Х.; Ян, Дж.; Ван, Т.; Се, Х.; Ян, С. Эффективное удаление арсената из воды с помощью верхних мелких наночастиц черия, обогащенных биоуглем Se³⁺, путем адсорбции ионного окисления. *Наук. Тотальная среда.* 2021, 794, 148691. [\[CrossRef\]](#)
71. Ниязи, НК.; Биби, И.; Шахид, М.; Оршо, ЮС.; Бертон, Э.; Ван, Х.; Шахин, С.; Ринклебе, Дж.; Люттге, А. Удаление мышьяка биоуглем/лигнитом периллы в водных растворах и грунтовых водах: комплексное спектроскопическое и микроскопическое исследование. *Окружающая среда. Загрязнение.* 2018, 232, 31–41. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
72. Бакши, С.; Баник, К.; Ратке, С.; Дж.; Лэрд, Д.А. Сорбция мышьяка на комплексных нуль-валентного железа с биоуглем. *Вода Рес.* 2018, 137, 153–163. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
73. Баумик, М.; Нубактеп, К.; Гугла, В.К.; МакКриндл, Род-Айленд; Мейти, А. Композитные нановолокна полианилин/FeO: отличный адсорбент для удаления мышьяка из водных растворов. *Хим. Анг. Л. Дж.* 2015, 271, 135–146. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
74. Шла, Т.; Наяка ЮА. Кинетика и термодинамика адсорбции ионов кадмия и свинца на наночастицах NiO. *Хим. Анг. Л. Дж.* 2012, 191, 123–131. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
75. Хуан, Ю.; Чжэн, Х.; Ху, Х.; Ву, Ю.; Тан, Х.; Он, К.; Гэн, С. Повышенная селективная адсорбция свинца(II) из сложных сточных вод с помощью наночастиц магнитного кремнезема, функционализированных ДТРА, покрытых хитозаном, на основе анионного оседреза. *Дж. Хазард. Матер.* 2021, 422, 126856. [\[CrossRef\]](#) [\[ПбМед\]](#)
76. Ким, Н.; Ли, Дж. М.; Чой, Дж. Х.; Ким, Д.Х.; Хан, Г.; Юнг, Х.-С. Синтез адсорбционных свойств наночастиц гематита, с опорожнением желатином (α-Fe₂O₃), для удаления свинца из сточных вод. *Дж. Хазард. Матер.* 2021, 416, 125696. [\[CrossRef\]](#) [\[ПбМед\]](#)
77. Эбосуба, ТК.; Эгвуниенга, МС.; Тиджани, Дж.О.; Мустафа, С.; Абдулкарим, А.С.; Ково, А.С.; Крикстолайтите, В.; Векша, А.; Вагнер, М.; Лисак, Г. Активированные многослойные углеродные нанотрубки, окрашенные наночастицами нуль-валентного никеля для адсорбции мышьяка, кадмия и свинца из сточных вод в периодическом и непрерывном проточном режиме. *Дж. Хазард. Матер.* 2021, 423, 126993. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПбМед\]](#)
78. Резания, С.; Модзири, А.; Парк, Дж.; Наврот, Н.; Войцеховска, Э.; Маррайки, Н.; Заглул Н.С. Удаление ионов свинца из сточных вод с помощью наночастиц сульфида лантана, декорированных магнитным оксидом графена. *Окружающая среда. Рез.* 2022, 204, 111959. [\[CrossRef\]](#) [\[ПбМед\]](#)
79. Альмомани, Ф.; Бхосале, Р.; Райше, М.; Кумар, А.; Альмомани, Т. Удаление ионов тяжелых металлов из промышленных сточных вод с использованием магнитные наночастицы (МН). *Прил. Серфинг. Наук.* 2020, 506, 144924. [\[CrossRef\]](#)
80. Сингх, Д.; Верма, С.; Гаутама, Р.К.; Кришна, В. Адсорбция меди на синтезированной нитрилтриуксусной кислоте, функционализированной Fe₃O₄. *Наночастицы: кинетические, равновесные и термодинамические исследования.* *Дж. Энвайрон. Хим. Анг. Л.* 2015, 3, 2161–2171. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
81. Сингх, С.; Первин, С.; Ранджан, А. Резкое улучшение адсорбции красителя конго-красного в композите полимер-наночастицы полианилин-цинк-титанат. *Дж. Энвайрон. Хим. Анг. Л.* 2021, 9, 105149. [\[CrossRef\]](#)
82. Дешланде, Б.; Агравал, П.; Йенки, М.; Добле, С. Перспективы нанотехнологий в деградации сточных вод: новые вызовы. *Нано-Структура. Нано-Объекты* 2020, 22, 100442. [\[CrossRef\]](#)
83. Джабасингх, С.А.; Белачев, Х.; Йимам, А. Наночастицы багассы, индуцированные оксидом железа, для связывания ионов Cr⁶⁺ на кожевенных заводах стока с использованием модифицированного реактора периодического действия. *Дж. Прил. Полимер. Наук.* 2018, 135, 135. [\[CrossRef\]](#)
84. Чжу, Д.; Шао, Дж.; Ли, З.; Ян, Х.; Чжан, С.; Чен, Х. Наноникель, встроенный в пористый биоугль на основе легированных N УНТ, для адсорбции - восстановление шестивалентного хрома. *Дж. Хазард. Матер.* 2021, 416, 125693. [\[CrossRef\]](#) [\[ПбМед\]](#)
85. Заиди, Р.; Хан, СУ.; Фаруки, И.; Азам А. Быстрая адсорбция Pb(II) и Cr(VI) из водного раствора гидроксидом алюминия. *Наночастицы: равновесие и кинетическая оценка.* *Матер. Сегодня. Проц.* 2021, 47, 14:30–14:37. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
86. Ян, Ю.; Чжан, Ю.; Ван, Г.; Ян, З.; Сиань, Дж.; Ян, Ю.; Ли, Т.; Гу, Ю.; Цзя, Ю.; Ли, Ю.; и другие. Адсорбция и восстановление Cr(VI) новым наноразмерным композитом FeS/хитозаном/биоугль из водного раствора. *Дж. Энвайрон. Хим. Анг. Л.* 2021, 9, 105407. [\[CrossRef\]](#)

87. Инь, Л.; Ми, Н.; Яо, Ю-Р.; Ли, Дж.; Чжан, Ю.; Ян, С.-Г.; Он, Х.; Ху, Х.; Ли, С.-Ю.; Ни, Л.-Х. Эффективное удаление Cr(VI) наночастицами FeS, модифицированными дубильной кислотой: эффективность и механизмы. *Наука о воде*. **англ.** 2021, *14*, 210–218. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
88. Ян Дж.; Чжан, Х.; ЮМ; Эммануэлавати, И.; Цзоу, Дж.; Юнь, З.; ЮК. Х. Оршодиспергированные наночастицы γ -Fe₂O₃ с высоким содержанием, инкапсулированные в макропористый диоксид кремния, с превосходной эффективностью удаления мышьяка. *Адв. Функции. Матер.* 2014, *24*, 1354–1363. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
89. Су, Х.; Йе, З.; Х. миди, Н. Высокоэффективные нанокompозитные адсорбенты оксида железа и оксида графена для удаления мышьяка. *Коллоиды Прибой. Физикосим.* **англ.** *Асп.* 2017, *522*, 161–172. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
90. Чжоу, К.; Хан, К.; Мин, Х.; Ян, Т. Одновременная адсорбция As(V) и Cr(VI) цеолитом, поддерживающим сульфидное наноразмерное нульвалентное железо: конкурентная реакция, сродство и механизм удаления. *Дж. Мол. Лик.* 2021, *338*, 116619. [\[CrossRef\]](#)
91. Якут, А.А.; Хан, З.А. Высокоэффективный нанокompозит из оксида графена с востановленным Zr-MnO₂ для эффективного и одновременного удаления анионов As(V) из проб воды из окружающей среды. *Дж. Мол. Лик.* 2021, *334*, 116427. [\[CrossRef\]](#)
92. Авокойя, К.Н.; Онинла, В.О.; Белло, Д.Д. Синтез окисленных наночастиц крахмала Dioscorea dumetorum для адсорбции ионов свинца (II) и кадмия (II) из сточных вод. *Окружающая среда. Нанотехнологии. Монит. Менеджер.* 2021, *15*, 100440. [\[CrossRef\]](#)
93. Ульгидум, А.; Буярмане, Х.; Лагзил, А.; Нунц, Ж.-М.; Саяби А. Разработка наночастиц гидроксиапатита с сульфатной функциональностью для удаления кадмия из водных растворов. *Наука о интерфейсах коллоидов. Коммун.* 2019, *30*, 100178. [\[CrossRef\]](#)
94. Шахрешуби, М.; Бахтиари, С. Эффективность композитов активированного угля и наночастиц магнетита при удалении меди: утилизация промышленных отходов, зеленый синтез, характеристики и исследование адсорбции и десорбции. *Микропористый мезопористый материал.* 2021, *311*, 110692. [\[CrossRef\]](#)
95. Чен, С.; Се, Ф. Селективная адсорбция ионов меди (II) в смешанном растворе магнитными наночастицами Fe₃O₄-MnO₂-EDTA. *Прил. Серфинг. наук.* 2020, *507*, 145090. [\[CrossRef\]](#)
96. Шаабан, Л.; Бейю Э.; Люю, Д.; Бауаб, МХ. В. Функционализация листов оксида графена наночастицами магнетита для адсорбции ионов меди и исследование его потенциальной каталитической активности в отношении гидроксиапатита алкинов в зеленых условиях. *Дж. Катал.* 2020, *388*, 91–103. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
97. Уайт, Р.Л.; Уайт, С.М.; Тургут, Х.; Масуд, А.; Тиан З.Р. Сравнительные исследования адсорбции меди оксидом графена и функционализированные наночастицы оксида графена. *Дж. Тайваньский институт. хим. англ.* 2018, *85*, 18–28. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
98. Джоши, П.; Маноча, С. Кинетические и термодинамические исследования адсорбции ионов меди на наночастицах гидроксиапатита. *Матер. Сегодня. Проц.* 2017, *4*, 10455–10459. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
99. Чжан, В.; Чжан, Д.; Лян, Ю. Нанотехнологии в очистке воды, загрязненной поли- и перфторалкильными веществами: Обзор. *Окружающая среда. Загрязнение.* 2019, *247*, 266–276. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
100. Ду, З.; Дэн, С.; Бэй, Ю.Х.; Уан, К.; Ван, Б.; Хуанг, Дж.; ЮГ. Адсорбционное поведение и механизм перфторированных соединений различных адсорбентах — обзор. *Дж. Хазард. Матер.* 2014, *274*, 443–454. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
101. Во, Г.Н.; Нго, Х.Х.; Го, В.; Нгуен, ТМХ.; Ли, Дж.; Лян, Х.; Дэн, Л.; Чен, З.; Нгуен, Т.А. Поли- и перфторалкильные вещества в воде и сточных водах: всесторонний обзор от источников до востановления. *Дж. Водный. проц. инж.* 2020, *36*, 101393. [\[CrossRef\]](#)
102. Испания, В.А.; Маллаварану, М.; Найдур, Р. Технологические очистки водного перфтороктансульфоната (ПФОС) и перфтороктаноата (ПФОК): критический обзор с упором на полевые испытания. *Окружающая среда. Технол. Иннов.* 2015, *4*, 168–181. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
103. Гонг, Ю.; Ван, Л.; Лю Дж.; Тан, Дж.; Чжао, Д. Удаление водной перфтороктановой кислоты (ПФОК) с использованием магнетита, стабилизированного крахмалом. *Наночастицы. наук. Тотальная среда.* 2016, *562*, 191–200. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
104. Рахмайзад, А.; Шах Абуддин, С.; Шахид, М.М.; Рашид НьюМексикский Хир, ЗАМ; Рамли, М.М.; Аванг, К.; Сионг, С.В.; Аспанут, З. Зеленый синтез наночастиц серебра из высокоэффективного экстракта коры катрантуса розового, нанесенного на оксид графена для эффективной адсорбции красителя метиленового синего. *Дж. Энвайрон. хим. англ.* 2020, *8*, 103955. [\[CrossRef\]](#)
105. Фуа, А.; Хасан, Ю.Ф.; Саид Э.; Хамва, М.Ф. Фотокаталитическая деградация реальных сточных вод текстильных и кожевенных заводов с использованием биосинтезированных наночастиц оксида магния (MgO-NP), адсорбция тяжелых металлов, фитотоксичность и антимикробная активность. *Дж. Энвайрон. хим. англ.* 2021, *9*, 105346. [\[CrossRef\]](#)
106. Пуррахим, С.; Салем, А.; Салем, С.; Тавангар, Р. Применение твердых отходов производства кокса для очистки сточных вод, загрязненных химическими активными красителями, с помощью соответствующего нанопористого оксида магния. *Окружающая среда. Загрязнение.* 2020, *256*, 113454. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
107. Регуйа, А.; Баркат, Д.; Джавад, А.; Абдулхамид, А.С.; Хан, М.Р. Синтез магнитно-сшитых наночастиц хитозана-гликоля /ZnO/Fe₃O₄ на основе Шиффа для усиленной адсорбции органических красителей: моделирование и исследование механизма. *Поддерживать. хим. Фарм.* 2021, *20*, 100379. [\[CrossRef\]](#)
108. Самрот, А.В.; Али, Х.Х.; Сельварани, Дж.; Фаруджева Э.; Раджи, П.; Пракаш, П.; Кумар, С. Эффективность адсорбции химических соединений синтезированных суперпарамагнитных наночастиц оксида железа (SPION) на кристаллическом фиолетовом красителе. *Курс. Рез. Зеленый синтез. хим.* 2021, *4*, 100066. [\[CrossRef\]](#)
109. Бадрай, П.; Кашьяп, С.; Бехера С.К. Адсорбция феноловых красителей гибридами GO-Fe₃O₄ в водных средах. *Окружающая среда. Нанотехнологии. Монит. Менеджер.* 2020, *13*, 100282. [\[CrossRef\]](#)
110. Чоухан, А.К.; Каттария, Н.; Гарг, В.Г. Изготовление наночастиц ZnO с использованием Eucalyptus spp. экстракта листьев и их применение при очистке сточных вод. *Химосфера* 2020, *247*, 125803. [\[CrossRef\]](#)
111. Алишис, С.; Мейтло, штат А.; Ли, Дж.; Ким, К.-Х. Сорбционные и мембранные технологии на основе нанотехнологий для очистки загрязнений нефтяного происхождения в природных экосистемах и потоках сточных вод. *Адв. Коллоидный интерфейс.* 2020, *275*, 102071. [\[CrossRef\]](#)
112. Сапутера, штат Вашингтон; Амри, А.Ф.; Даяя, Н.Р.; Сасонгко, Д. Фотокаталитическая технология очистки сточных вод заводов по производству пальмового масла (POME). *Лечение: текущий прогресс и перспективы на будущее. Материалы* 2021, *14*, 2846. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

113. Бети, Б.; Соनावане, Ш; Бханасе, бакалавр; Гумфарс, С.П. Усовершенствованные процессы окисления сточных вод на основе наноматериалов: лечение: обзор. *хим. анг. л. Проц. есс.* — Интенсивный процесс. 2016, 109, 178–189. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
114. Джаванбахт, В.; Мохаммадиан, М. Усовершенствованные процессы фотоокисления для эффективного удаления анионных и катионных красителей с использованием нанофотокатализатора бентонит/TiO₂, иммобилизованного наночастицами серебра. *Дж. Мол. Структура* 2021, 1239, 130496. [\[CrossRef\]](#)
115. Акья, Д. Фотокатализатор gO-TiO₂-CdO-ZnO-Ag для усиления фотокалитической дегреации метиленового синего. *Опция Матер.* 2021, 116, 111090. [\[CrossRef\]](#)
116. Кани, Д.; ван дер Ваал, J.C.; Пескарман, П.П. Высокотугные легированные наночастицы TiO₂, внедренные в поверхность SiO₂ в качестве фотокатализаторов разложения загрязняющих веществ под действием видимого и УФ-излучения. *Прил. Катал. Генерал* 2021, 621, 118179. [\[CrossRef\]](#)
117. Мусаев, М.; Горбани-Могадам, Т.; Компани, А. Исследование фотокалитической дегреации метиленового синего с использованием наночастиц La_{0.7}Sr_{1.3}CoO₄ Раддлесдена-Попера. *Керам. Межд.* 2021, 47, 20651–20658. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
118. Адекунле, А.С.; Ойекунле, Дж.А.; Дуросинми, LM; Олувафем, ОС; Оланджу, Д.С.; Акинола, А.С.; Обисекан, Орегон; Акиниеле, Оф; Аджайоба, Т.А. Потенциал кобальта и наночастицы оксида кобальта в качестве нанокатализатора разложения красителей в сточных водах. *Нано-Структура. Нано-Объекты* 2020, 21, 100405. [\[CrossRef\]](#)
119. Го, Ф.; Чен, З.; Хуанг, Х.; Цю, Л.; Чен, Х.; Ши, В.; Чен, Л. Наночастицы Cu₂P украсили полый трубчатый нитрид углерода как превосходный фотокатализатор фотодегреации тетрациклина в видимом свете. *Сентябрь Пуриф. Тех. нол.* 2021, 275, 119223. [\[CrossRef\]](#)
120. Кефед, К.К.; Мамба, Б.Б. Фотокалитическое применение наночастиц и нанокмполитов шпинель-феррита в очистке сточных вод: Обзор. *Поддерживать. Матер. Тех. нол.* 2020, 23, e00140. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
121. Мухамбиди, Р.; Пам, В.; Субраманиам, П. Фотокалитическая дегреация анилинового синего, бриллиантового зеленого и прямого окрасного 80 с использованием нанокмполитов NiO/CuO, CuO/ZnO и ZnO/NiO. *Окружающая среда. Нанотехнологии. Монит. Менеджер.* 2020, 14, 100360. [\[CrossRef\]](#)
122. Дхас, Ч.Р.; Венкатеш, Р.; Джотивенкаталам, К.; Нитья, А.; Бенджамин, бакалавр наук; Радж, АМЕ; Джеядипан, К.; Сандживираджа, К. Фотокалитическая дегреация родамина В и Direct Red под действием видимого света с использованием наночастицы оксида кобальта. *Керам. Межд.* 2015, 41, 9301–9313. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
123. Альзахрани, Э. Фотодегреация бинарных азокрасителей с использованием наносфертипа ядро-оболочка Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂. *Являясь. Дж. Анал. хим.* 2017, 8, 95–115. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
124. Стэнли, Р.; Джебасингх, Дж.А.; Стэнли, Г.К.; Поними, П.; Шекина, М.; Васанти, Дж. Превосходное фотокалитическое разложение красителей метиленового синего, родамина В и метиленового оранжевого с помощью нанокмполита Ag-ZnO при естественном солнечном облучении. *Оптик* 2021, 231, 166518. [\[CrossRef\]](#)
125. Чжан, В.; Ван, К.; Юн, Н. Нанокмполитный фотокатализатор TiO₂/HZSM-5: обработка NaZSM-5 HCl с последующим фотокалитическая дегреация метиленового синего. *хим. анг. л. Дж.* 2010, 163, 62–67. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
126. Ву, Т.А.; Дао, компакт-диск; Хоанг, Т.Т.; Нгуен, Коннектикут; Ле, Г.Х.; Данг, П.Г.; Тран, Х.Т.; Нгуен, Т.В. Высокая фотокалитическая активность нового наноразмерного Ag₃PO₄ в отношении дегреации родамина В под воздействием видимого света. *Матер. Летт.* 2013, 92, 57–60. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
127. Ашик, Х.; Надим, Н.; Манша, А.; Икбал, Дж.; Ясин, М.; Захид, М.; Шахид, И. G-C3N₄/Ag@CoWO₄: Новый тройной нанокмполит, активный под действием солнечного света, для потенциального фотокалитического разложения красителя родамина В. *Дж. Физ. хим. Solids* 2021, 161, 110437. [\[CrossRef\]](#)
128. Дариани, Р.; Эсмаили, А.; Мортезаали, А.; Деганур, С. Фотокалитическая реакция и разложение метиленового синего на наночастицах TiO₂. *Оптик* 2016, 127, 7143–7154. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
129. Ню, З.; Тао, Х.; Хуанг, Х.; Цинь, Х.; Рен, К.; Ван, Ю.; Шан, Б.; Лю Ю. Грин синтез магнитно перерабатываемых композитов Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄@Zn_{1-x}MnxS из отработанных батарей для фотокалитического разложения фенола в видимом свете. *Химосфера* 2021, 287, 132238. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
130. Джасал, В.; Шанкер, У.; Кейт, бакалавр наук; Шанкар, С. Грин. Синтез нанокмполитов гексаэдрического ианоферрата калия-цинка и их потенциал. применение в фотокалитической дегреации органических красителей. *РСК Адв.* 2015, 5, 26141–26149. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
131. Мортезави-Деразкола, С.; Зиналло-Аджабшир, С.; Салавати-Нисари, М. Простое гидротермальное и новое получение наноструктурированного Ho₂O₃ для фотодегреации красителя эриохрома черного Т как загрязнителя воды. *Адв. Порошковая технология*. 2017, 28, 747–754. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
132. Зиналло-Аджабшир, С.; Салавати-Нисари, М. Фотокалитическая дегреация красителей эритрозина и эриохрома черного Т с использованием наноструктур Nd₂Zr₂O₇, полученных с использованием модифицированного подхода Печини. *Сентябрь Пуриф. Тех. нол.* 2017, 179, 77–85. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
133. Саад, АМ; Абухадра, г-н; Ахмед, С.А-К.; Эльзанати, АМ; Мэди, АХ; Бетиха, М.; Шим, Ж.-Ж.; Раби, АМ. Фотокалитическая дегреация красителя малахитового зеленого с использованием нанокветков ZnO на итотане и Ce-ZnO в видимом свете. *Дж. Энвайрон. Менеджер.* 2020, 258, 110043. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
134. Парк, Дж.К.; Рупа, Э.Дж.; Ариф, МК; Ли, Дж.Ф.; Анандападманабан, Г.; Канг, Япония; Ким, М.; Ан, Джей Си; Актер, Р.; Ян, округ Колумбия; и другие. Синтез наночастицы оксида цинка из экстрактов *Gynostemma pentaphyllum* и оценка фотокалитических свойств с последующим обесцвечиванием малахитового зеленого красителем под УФ-освещением - Зеленый подход. *Оптик* 2021, 239, 166249. [\[CrossRef\]](#)
135. Лю, Г.; Абухадра, г-н; Эль-Шебани, АМ; Мосафа, АМ; Эльмелиджи, МА. Изучение фотокалитических свойств композита диатомит/Ni/NiO для эффективного фотодегреации красителя малахитового зеленого и фотосинтеза. *Сг (VI) в видимом свете. Дж. Энвайрон. Менеджер.* 2020, 254, 109799. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
136. Вэй, С.; Чен, Ю.Ху, Х.; Ван, К.; Хуанг, Х.; Лю, Д.; Чжан Ю. Разделение одновалентных и двухвалентных солей с помощью тонкопленочной нанокмполитной наноперфорированной мембраны, содержащей аминированные наночастицы TiO₂. *Дж. Тайваньский институт хим. анг. л.* 2020, 112, 169–179. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
137. Разми, А.; Мансури, Дж.; Чен, В. Влияние химических и физических модификаций наночастицы TiO₂ на импакт-поверхности, структуру и эффективность загрязнения полиэфирных ультрафильтровальных мембран. *Дж. Член. наук.* 2011, 378, 73–84. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
138. Ян, Л.; Ли, ЮС.; Ся, Н. СВ. Получение ультрафильтровальной мембраны из поливинилиденфторид (ПВДФ), модифицированной наноразмерами оксида алюминия (Al₂O₃) и его исследования по предотвращению образования. *Полимер* 2005, 46, 7701–7706. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

139. Бао, М.; Чжу, Г.; Ван, Л.; Ван, М.; Гао, К. Получение монодисперсных сферических мезопористых тонкопленочных композитных мембран обратного осмоса нанокремнезем-полиамид посредством межфазной полимеризации. *Опреснение* 2013, 309, 261–266. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
140. Дай, Р.; Хан, Х.; Ван, Т.; Ли, Х.; Ван, З. Улучшенное удаление гидрофобных соединений, разрушающих эндокринную систему, из сточных вод с помощью нанофильтрационных мембран, интеркалированных гидрофильными нанолистами MoS₂: роль поверхностных свойств и внутренних наноканалов. *Дж. Член. наук.* 2021, 628, 119267. [\[CrossRef\]](#)
141. Моради, Г.; Зинадини, С.; Раджаби, Л. Разработка высокопоточной нанофильтрационной мембраны с использованием наночастиц парааминобензоата ферроксана для улучшения противобактериальных свойств и удаления красителей. *Прогресс Саф. Окружающая среда. Прогр.* 2020, 144, 65–78. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
142. Ваганпур, В.; Хадем, С.С.М.; Матери-Фарахани, М.; Мослех, Н.; Гянджали, Г.-н.; Бадеи, А.; Пурбашир, Э.; Мешхадзаде, А.Х.; Мунир, Монтана; Махмуди, Г.; и другие. Противобактериальные и проницаемые нанофильтрационные мембраны из поливинилхлорида с островными гидрофильными графеновыми квантовыми точками для очистки сточных вод с красителями. *Дж. Водный прогресс, инженер.* 2020, 38, 101652. [\[CrossRef\]](#)
143. Шабаби, М.; Абдаллах, Х.; Сениан, А.; Соловский, Г.; Савчак, М.; Шабан, А.; Рамадан, Р. Лазерно-интегрированные наночастицы золота с мезо-NF-мембран для отделения фосфатов из сточных вод. *Сентябрь Пуриф. Технол.* 2020, 247, 116994. [\[CrossRef\]](#)
144. Халид Ф.; Табиш, М.; Бора, К.А.И. Новая нанофильтрационная мембрана из поливинилового спирта, модифицированная агатавом, покрытым дофамином. Наночастицы ядро-оболочка TiO₂. *Дж. Водный прогресс, инженер.* 2020, 37, 101486. [\[CrossRef\]](#)
145. Лиг, А.М.; Брайант, Э.; Колвин, В.Л.; Ли, К. Инактивация вирусов наночастицами диоксида титана, легированным серебром, для очистки питьевой воды. *Вода Рес.* 2011, 45, 535–544. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
146. Лафлам, О.; Серодес, Ж.-Б.; Симард, С.; Легей, К.; Дореа, К.; Родригес, М.Дж. Возникновение и судьба побочных продуктов озонной дезинфекции в двух канадских системах питьевой воды. *Химосфера* 2020, 260, 127660. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
147. Лин, С.; Хуанг, Р.; Ченг, Ю. Лю Дж.; Лау, Б.Л.; Визнер, М.Р. Композитные шарики из наночастиц серебра и алыгината для дезинфекции питьевой воды в точках использования. *Вода Рес.* 2013, 47, 3959–3965. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
148. Ву, Ю.Т.; Проложенный; Маклейн, Дж.Л.; Манибусан, М.; Делларко, В. Использование анализа взаимодействия с структурами на основе механизмов при ранжировании канцерогенного потенциала побочных продуктов дезинфекции питьевой воды. *Окружающая среда. Перспектива здоровья.* 2002, 110 (Приложение 1), 75–87. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
149. Канеко, М.; Окура, И.Е. (ред.) *Фотокатализ: наука и технологии*; Спрингер: Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 2002 г.; ISBN 3-540-43473-9.
150. Мотшекга, С.К.; Рэй, С.С.; Мэйти, А. Синтез и характеристика алыгинатных шариков, инкапсулированных наночастицами оксида цинка, для дезинфекции бактерий в воде. *Наука о коллоидном интерфейсе.* 2018, 512, 686–692. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
151. Пратна, Т.К.; Шарма, С.К.; Кеннеди, М. Наночастицы в очистке воды на бытовом уровне: обзор. *Сентябрь Пуриф. Технол.* 2018, 199, 260–270. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
152. Цян, С.; Тан, К.; Гонг, З.; Чжан, З.; Ван, Д.; Фан, М. Простое получение внедренных наночастиц серебра, покрытых итритом. *Ткань логнотобумажная для дезинфекции воды в местах потребления. Матер. Летт.* 2020, 277, 128256. [\[CrossRef\]](#)
153. Рай, П.К.; Кумар, В.; Ли, С.; Рава, Н.; Ким, К.-Х.; Хоррошо, Ю.С.; Цанг, округ Колумбия. Взаимодействие наночастиц и растений: последствия для энергетической, окружающей среды и сельскохозяйственного орошения. *Окружающая среда. Межд.* 2018, 119, 1–19. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
154. Бхардвадж, А.К.; Сундарам, С.; Ядав, К.К.; Шивасаттав, А.Л. Обзор наночастиц серебра как перспективных материалов для воды дезинфекция. *Окружающая среда. Технол. Иннов.* 2021, 23, 101721. [\[CrossRef\]](#)
155. Хан, С.Т.; Малик, А. Разработанные наноматериалы для обеззараживания и очистки воды: от лаборатории к продуктам. *Дж. Хазард. Матер.* 2019, 363, 295–308. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
156. Роза, Л.Р.; Роза, Р.Д.; Да Вейга, MAMS Коллоидное серебро и биодоступность наночастиц серебра в фильтрате питьевой воды. *Дж. Энвайрон. хим. англ.* 2016, 4, 3451–3458. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
157. Мпеня-на-Монья, Ц.И., Л.; Мгомбени, Н.; Оньянго, М.; Момба, М. Влияние загрузки материала и скорости потока на дезинфекцию патогенных микроорганизмов с использованием системы фильтров катионная смолананочастицы серебра. *Физ. хим. Части Земли A/B/C* 2017, 100, 181–188. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
158. Арора, Р. Нанодисперсии для удаления мышьяка из сточных / грунтовых вод для управления энергетикой и окружающей средой — обзор. *Матер. Сегодня. Прогр.* 2021, 45, 4437–4440. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
159. Пинакиду, Ф.; Кацкини, М.; Палура, Э.; Симеонидис, К.; Митрака, Э.; Митракас, М. Мониторинг роли Mn и Fe в эффективности удаления As наночастицами ферроксиита четырехвалентного марганца из питьевой воды: исследование рентгеновской абсорбционной спектроскопии. *Наука о коллоидном интерфейсе.* 2016, 477, 148–155. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
160. Беттини, С.; Пагано, Р.; Валли, Л.; Джанкане, Г. Резкое удаление ионов никеля из водного раствора с помощью Ag₂ блокированного окуркумином наночастицы. *Наноматериалы* 2014, 6, 10113–10117. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
161. Симеонидис, К.; Капрана, Э.; Самарас, Т.; Ангелакерис, М.; Пляцикас, Н.; Вурлиас, Г.; Митракас, М.; Андригос, Н. Оптимизация магнитных наночастиц для технологий питьевой воды: случай Cr(VI). *наук. Тотальная среда.* 2015, 535, 61–68. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
162. Маркеб, А.А.; Алонс, А.; Санчес, А.; Фонт, Х. Прогресс адсорбции фторидов из питьевой воды магнитным сердечником-оболочкой. *Se-Ti@Fe₃O₄ и наночастицы оксида Se-Ti. наук. Тотальная среда.* 2017, 598, 949–958. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
163. Риах, И.Ф.; Багераде, М.; Хадизаде, З. Модификация суперпарамагнитных наночастиц Fe₃O₄ оксидом циркония; подготовка, характеристика и его применение для удаления фторида. *РСК Адв.* 2015, 5, 72058–72068. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
164. Рой, Э.; Патра, С.; Махури, Р.; Шарма, П. Единое решение для удаления мышьяка и мышьяка из питьевой воды с использованием модифицированной наночастицы цистеина @ ZnS: TiO₂ фильтрационной мембраны с молекулярным отпечатком, устойчивой к биообрастанию. *хим. англ. Дж.* 2016, 304, 259–270. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
165. Луан, Х.; Тейчене, Б.; Хуанг, Х. Эффективное удаление As(III) наночастицами меди, интеркалированными в мембраны из углеродных нанотрубок для очистки питьевой воды. *хим. англ. Дж.* 2019, 355, 341–350. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

166. Гора, С.Л.; Эндрюс, С.А. Adsorption of natural organic substances and precursors of by-products of disinfection of surface waters on nanosized TiO_2 : effects of pH, modeling of isotherms and consequences of using TiO_2 for purification of drinking water. *Химосфера* 2017, 174, 363–370. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
167. Гора, С.; Лян, Р.; Чжоу, ЮН.; Эндрюс, С. Оседляемые наноматериалы диоксида титана для удаления природных органических веществ из питьевой воды. *Хим. анг. л. Дж.* 2018, 334, 638–649. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
168. Гора, С.Л.; Эндрюс, С.А. Удаление природных органических веществ и предшественников побочных продуктов дезинфекции из питьевой воды с использованием фотокаталитических регенерируемых наноразмерных адсорбентов. *Химосфера* 2019, 218, 52–63. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
169. Кумари, М.; Гупта, С.К. Новый процесс адсорбции усиленной коагуляции-флокуляции с добавлением магнитных нанoadсорбентов для удаления ароматических и гидрофобных фракций природных органических веществ, а также мутности из питьевой воды. *Дж. Чистый. Прод.* 2020, 244, 118899. [\[CrossRef\]](#)
170. Паризи, К.; Вигани, М.; Родригес-Серес, Э. Сельскохозяйственные нанотехнологии: Каковы текущие возможности? *Нано Сегодня* 2015, 10, 124–127. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
171. Сервин, А.Д.; Уайт, Дж. К. Нанотехнологии в сельском хозяйстве: Следующие шаги для понимания воздействия и рисков, связанных с искусственными наночастицами. *НаноИмпорт* 2016, 1, 9–12. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
172. Анарья, А.; Пал, П.К. Сельскохозяйственные нанотехнологии: применение результатов исследований в полевых условиях путем воздействия на экологическую устойчивость. *NanoImpact* 2020, 19, 100232. [\[CrossRef\]](#)
173. Радхугут, В.; Минкина Т.; Сушкова С.; Бехал, А.; Максимов А.; Блихарская, Э.; Каваря, Н. К.; Мовсесян, Х.; Барсова Н. Наночастицы ZnO и CuO : угроз почвенным организмам, растениям и здоровью человека. *Окружающая среда. Глоб. им. Здоровье* 2019, 42, 147–158. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
174. Усман, М.; Фарук, М.; Уэйкил, А.; Навас, А.; Алам Чима, Ю.Р.; Рехман, Х. у.; Ашраф, И.; Санаулла, М. Нанотехнологии в сельском хозяйстве: Текущее состояние, проблемы и будущие возможности. *Наук. Общ. Окружающая среда* 2020, 721, 137778. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
175. Дероса, МС; Монреаль, К.; Шнитцер, М.; Уолш, Р.; Султан Ю. Нанотехнологии в удобрениях. *Нат. Нанотехнологии*. 2010, 5, 91. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
176. Джирото, А.С.; Гимаринш, GGF; Фоскини, М.; Рибейро, К. Роль нанокompозитных удобрений медленного действия на доступность азота и фосфора в почве. *Наук. Отчет* 2017, 7, 46032. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
177. Омбоди, А.; Сайгус, М. Разбросное внесение по сравнению с ленточным внесением удобрений с полиолефиновым покрытием на зеленый перец, выращиваемый на андском оле. *Дж. Растение Nutr.* 2000, 23, 1485–1493. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
178. Ка, М.; Кукана, РС; Гогос, А.; Бучели Т.Д. Критическая оценка наночастиц и нанодобавок по сравнению с их традиционными аналогами. *Нат. Нанотехнологии*. 2018, 13, 677–684. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
179. Коррадини, Э.; Де Мура, MR; Маттос, Б.А. Предварительное исследование включения NPK-удобрений в наночастицы из иголки. *Экспресс Полимер. Летт.* 2010, 4, 509–515. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
180. Уилсон, Масачусетс; Тран, НьюХэмпшир; Милев А.С.; Каннангара, Г.С.К.; Волк, Х.; Лу, Г. (Макс.) Наноматериалы в почвах. *Геодемия* 2008, 146, 291–302. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
181. Дуан, Дж.С.; Кумар, Р.; Кумар, Н.; Каур, П.; Нера, К.; Дуан, С. Нанотехнологии: новый взгляд на точное земледелие. *Биотехнология. Респ.* 2017, 15, 11–23. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
182. Чипа, Х. Нанодобавки и наночастицы для сельского хозяйства. *Окружающая среда. Глоб. им. Летт.* 2017, 15, 15–22. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
183. Сю Ю.Ю. Хунг, Ж.-Х.; Чен, Ж.-К.; Чунг, Х.-В. Влияние размера и формы наночастиц серебра на рост растений *Arabidopsis* и экспрессия генов. *Физиология растений. Биохим.* 2014, 83, 57–64. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
184. Кэрригер, Дж.; Рэнд, генеральный менеджер; Гардинали, РР; Перри, ВВ; Томпкинс, Мисисипи; Фернандес, А.М. Пестициды, представляющие потенциальную экологическую опасность в отложениях из каналов Южной Флориды: приоритизация экологических рисков для водных членистоногих. *Загрязнение почвенных отложений. Межд. Дж.* 2006, 15, 21–45. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
185. Явиколи, И.; Лес, В.; Бизхолд, Д.; Шведова А.А. Нанотехнологии в сельском хозяйстве: возможности, токсикологические последствия и профессиональные риски. *Токсикол. Прил. Фармакол.* 2017, 329, 96–111. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
186. Бергесон, Л.Л. Наносеребро: Управление пестицидами Ag-содержащих окружающей среды США обдумывает, как лучше действовать. *Окружающая среда. Квал. Менеджер.* 2010, 19, 79–85. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
187. Гуань, ЮФ; Пирс, Р.К.; Мелечко А.В.; Хенсли, Д.; Симпсон, М.; Рэк, П. Импульсное лазерное обезвреживание никелевого катализатора науглеродистом рост нановолокон. *Нанотехнологии* 2008, 19, 235604. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
188. Кумар, RSS; Шайни, Пи Джей; Анджали, Швейцария; Джеробин, Дж.; Гогшен, К.М.; Магдаси, С.; Мукарджи, А.; Чандрасекаран, Н. Отличительные эффекты наноразмерного перметрина в окружающей среде. *Окружающая среда. Загрязнение. Рез.* 2013, 20, 2593–2602. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
189. Панкадж, Шкил, Н.А.; Кумар, Дж.; Сингх, МК; Сингх, К. Оценка биоспецифичности с составом контролируемым высвобождением на основе амфифильного нанополимера карбофурана против меланоидина, инкогнитивного заражения томатов. *Дж. Энвайрон. Наук. Здоровье, часть В* 2012, 47, 520–528. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
190. Прадхан, С.; Рой, И.; Лод, Г.; Патра, П.; Чоудри, СР; Саманта, А.; Гогвами, А. Оценка токсичности и биобезопасности наночастиц ПВГ-илированного ацетата биологически безопасная альтернатива нейротоксичным пестицидам. *Дж. Энвайрон. Наук. Здоровье, часть В* 2013, 48, 559–569. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
191. Ким, SW; Ким, Канзас; Ламал, К.; Ким, Ю.Дж.; Ким, С.Б.; Юнг, М.; Сим, С.-Дж.; Ким, Х.-С.; Чанг, С.-Дж.; Ким, Дж.К.; и другие. Исследование in vitro противоречивого действия наночастиц серебра на возбудителя дубового оувания *Raffaelea* sp. *Дж. Микробиол. Биотехнология* . 2009, 19, 760–764. [\[PubMed\]](#)
192. Чипа, Х.; Каушик, Н. Разработка нанобипестицидов с использованием экстракта железа и эвкалипта и их применение в борьбе с вредителями. В материалах симпозиума по последним достижениям в области биотехнологии для производства продуктов питания и топлива, TERI, Нью-Дели, Индия, 19–20 ноября 2015 г.

193. Гогос, А.; Кнауэр, К.; Бучели, Т.Д. Наноматериалы в защите растений и удобрениях: современное состояние, перспективы применения, и приоритеты исследований. *Дж. Агр. Пищевая хим.* 2012, 60, 9781–9792. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
194. Стадлер, Т.; Бутелер, М.; Уивер, Дж.; Софи, С. Сравнительная токсичность наноструктурированного оксида алюминия и коммерческой инертной пыли для *Sitophilus oryzae* (L.) и *Rhizopertha dominica* (F.) при различных уровнях влажности окружающей среды. *J. Сохраненный продукт. Рез.* 2012, 48, 81–90. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
195. Шла, К.К.; Натараджан, Н.; Наккиран, С. Противогрибковая активность наночастиц оксида цинка, серебра и диоксида титана против *Макрофрина фазеолина*. *Индийская соц. Микол. Распространенный патол.* 2014, 44, 268–273.
196. Грилло, Р.; душ Сантос, Новая Зеландия; Маруяма, Ч.Р.; Роза, АХ; Лима, Р.; Фрачетто, Л. Поли(ε-капролактон)нанокapsулы как системы-носители гербицидов: физико-химическая характеристика и оценка генотоксичности. *Дж. Хавард. Матер.* 2012, 231–232, 1–9. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
197. Лим, С.; Басри, М.; Омар, Д.; Абдул Рахман, МВ; Салех, АВ; Раджа Абдул Рахман Рахман, RNZ Зеленый состав изопропиламина, содержащий о-глицерат, содержащий наномульсию для подавления наперстянки ползучей (*A.gangetica*), сорняк-катокопугицы (*D. ocimifolia*) и буйволиной травы (*P. conjugatum*). *Управление по борьбе с вредителями. наук.* 2012, 69, 104–111. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
198. Экманн, Л.-Х.Л.; Ховгарт, МБ; Саверленд, Д.С.; Аутруп, Х.; Безенбахер, Ф.; Скотт-Фордсман, Дж. Дж. Скрининг токсичности избранных неорганических наночастиц с помощью предельного отношения к дождевому червю *Eisenia fetida*. *Экотоксикология* 2010, 20, 226–233. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
199. Клерк, Л.; Джакку, Э.; Лабарт, П. Обзор социальных наук о цифровом сельском хозяйстве, умном сельском хозяйстве и сельском хозяйстве 4.0: Новое вклада будущего программы исследований. *НЯС Вегетинг. Дж. Науки о жизни.* 2019, 90–91, 100315. [\[CrossRef\]](#)
200. Москвин, Г.А.; Сакоуиц, Е.Г. Новый метод и недорогой интеллектуальный инструмент для обнаружения мошенничества и контроля соответствия сельскохозяйственной продукции. В материалах ежегодного собрания ASAE 2002 г., Чикаго, Иллинойс, США, 28–31 июля 2002 г.; Американское общество инженеров сельского хозяйства и биологов (ASABE): Сент-Джозеф, Мичиган, США, 2002 г.; Том 1, с. 1.
201. Дэй, В. Инженерная точность в изменяющихся биологических системах. *Анна. Прил. Биол.* 2005, 146, 155–162. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
202. Нитираджан, С.; Тутея, Словакия; Хуанг, С.-Т.; Келтон, Д. Последние достижения в области биосенсоров для животных и домашнего скота: управление здоровьем. *Биосенс. Биоэлектрон.* 2017, 98, 398–407. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
203. Александратос, Н.; Бруинсма, Дж. Мировое сельское хозяйство на пути к 2030/2050 году: пересмотр 2012 года. Рабочий документ ЕКА, Рим, 2012 г.; FAO: Рим, Италия, 2012 г.
204. Антонанчи, А.; Ардуини, Ф.; Москоне, Д.; Паллески, Г.; Сконья-милли, В. Наноструктурные (био)сенсоры для умного сельского хозяйства. *ТРАК Тенденции анализа им.* 2018, 98, 95–103. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
205. Ског-милли, В. Нанотехнологии в мониторинге уровня глюкозы: достижения и проблемы за последние 10 лет. *Биосенс. Биоэлектрон.* 2013, 47, 12–25. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
206. Мали, Южная Каролина; Радж, С.; Триведи, Р. Нанотехнологии: новый подход к повышению урожайности сельскохозяйственных культур. *Биохим. Биофиз. Република* 2020, 24, 100821. [\[CrossRef\]](#)