



Добрый день, уважаемые коллеги! Наша группа представляет доклад на тему «**Современные методы биохимии для решения экологических проблем**». Работа была выполнена магистрантами первого года обучения: Арсением Лещевым, Анастасией Петровой и Дмитрием Любичевым.

## Мировые экологические проблемы



**«Человечество не погибнет в атомном кошмаре  
— оно задохнется в собственных отходах»**

**Нильс Бор**

**2**

Одна из глобальных проблем человечества в XXI веке – загрязнение воздуха, почвы и гидросферы отходами промышленной, научной, бытовой и военной отраслей жизнедеятельности человечества. Каждый день производятся миллионы тонн отходов, которые утилизируются обычным сбросом в окружающую среду или захоронением на свалках или специализированных местах хранения. За последние несколько десятков лет ухудшение экологии и осязаемое снижение качества жизни населения поставило перед человечеством важную задачу по созданию новых экологически безопасных и экономически выгодных методов переработки отходов и очищения биосферы Земли. Биохимические методы являются одними из наиболее перспективных для эффективной очистки сред от основных техногенных загрязнителей.



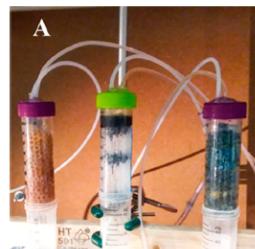
Имеется множество различных загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу, почву и гидросферу, на слайде представлены их основные группы. Так, для атмосферы характерно загрязнение летучими органическими и неорганическими реагентами, выбрасываемыми различными промышленными и добывающими предприятиями. Почву загрязняют тяжелые металлы, различные органические и неорганические отходы, находящиеся в виде твердых соединений и смесей. Через землю токсичные вещества попадают в циклы жизнедеятельности флоры и фауны. Более того, многие из загрязнителей попадают в подземные воды, отравляя более крупные биологические системы, особенно если речь идет о радиоактивных отходах. Кроме того, для гидросферы очень опасны разливы углеводородов, смолистых и жирных веществ, ПАВов и микропластика, которые пагубно отражаются на всем живом в водной сфере. Для их эффективного удаления были предложены новые методы очистки.



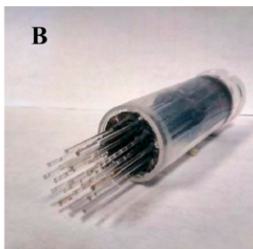
Биохимические методы основаны на способности конкретных микроорганизмов поглощать, аккумулировать или использовать для питания техногенные загрязняющие элементы. Они отличаются особой специфичностью: каждый отдельный микроорганизм зачастую специализируется на определенном узком ряде загрязнителей и на сегодняшний день не существует универсальной биохимической системы, которая была бы способна очищать биосферу от всех загрязняющих элементов. Один из наиболее распространенных методов – биофильтрация – способ минерализации органических веществ и адсорбции, разложения или накопления неорганических элементов различными микроорганизмами. Также широко распространена биоремедиация - способ очистки загрязненных сред, в том числе воды, почвы и воздуха, путем изменения условий окружающей среды для стимулирования роста микроорганизмов и растений и удаления целевых загрязнителей. Также есть биоаугментация, биостимулирование и использование биоскрубберов. Биоаугментация – метод, предусматривающий добавление бактериальных культур, необходимых для ускорения скорости деградации загрязнителя при наличии естественных низкоэффективных культур. Биостимулирование – использование различных микроорганизмов для удаления загрязнителей при отсутствии каких-либо естественных очистителей. Биоскруббинг – это

использование специальных двухблочных абсорбционных установок для поглощения и последовательной деградации поллютантов.

## Биохимическая очистка воздуха



А (слева направо): фильтр с растущей биомассой, стеклянный капиллярный микробиореактор, пенополиуретановый фильтр



В: Стеклянный капиллярный микробиореактор (без бактериальных клеток)

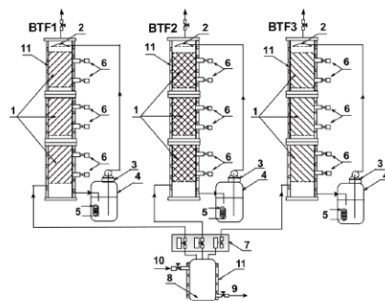
Миниатюрные биореакторы с максимальной площадью поверхности к объёму позволяют увеличить смешивание и массовый перенос загрязняющих веществ в биопленку, что приводит к большей скорости деградации летучих органических соединений

López de León L. R., Deaton K. E., Deshusses M. A. (2018). *Environmental Science & Technology*. doi:10.1021/acs.est.8b05209, IF = 7,27

5

Во-первых, рассмотрим очистку воздуха. Наиболее удобный биохимический метод, получивший широкое распространение, – очистка с помощью биофильтров. Группой ученых из Северной Каролины было произведено исследование эффективности новой биофильтрационной системы по удалению летучих органических соединений (ЛОС) из воздуха в помещениях (на слайде представлено аппаратное оснащение данной системы). Созданный микробиореактор для интенсивной обработки ЛОС сочетается с микроконцентратором ЛОС. Его функционал заключается в поглощении ЛОС из воздуха и выпуске их в микробиореактор в более высокой концентрации. Миниатюрные биореакторы с максимизированным отношением площади поверхности к объёму позволяют увеличить смешивание и массоперенос загрязняющих веществ на биопленку, что приводит к большей скорости разложения ЛОС. Были разработаны три различных микробиореактора и оценена их эффективность по удалению паров толуола и метанола: полученные значения в 40-80 раз превышают показатели, получаемые в обычных биофильтрах. Результаты показывают, что микробиореакторы являются перспективными технологиями контроля небольших количеств органических загрязнителей.

## Экспериментальные биофильтры

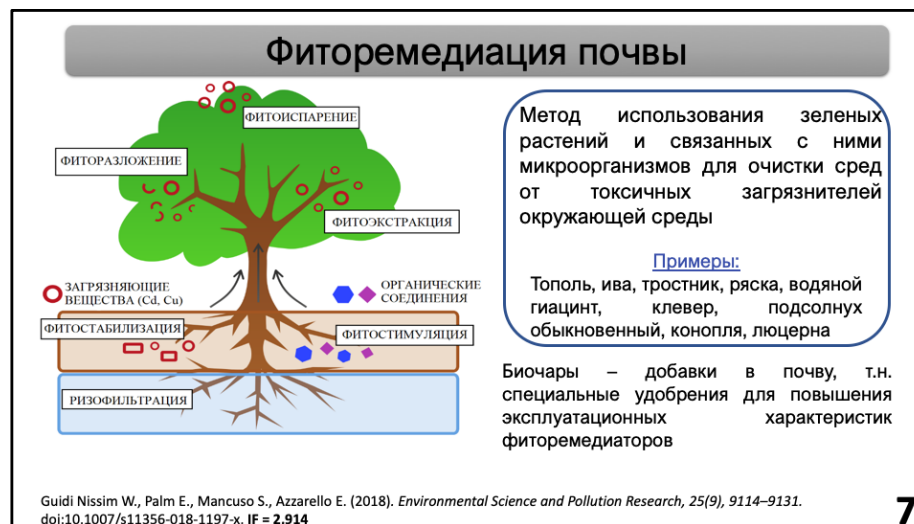


Схематическое представление экспериментальной установки: (1) уплотненные слои, (2) разбрызгиватели, (3) циркуляционные насосы, (4) контейнеры с питательным раствором, (5) терморегуляторы, (6) клапаны отбора проб, (7) регуляторы биогаза, (8) резервуар для выравнивания биогаза, (9) сливной клапан, (10) источник биогаза и (11) система теплоизоляции и отопления

Ziemniński K., Kopycki W. J. (2016). *Energy & Fuels*, 30(11), 9386–9395. doi:10.1021/acs.energyfuels.6b01374, IF = 3,277

6

Для осуществления очистки воздуха в более крупных масштабах разрабатываются биофильтрационные системы, применяемые на очистных сооружениях. В работе ученых из института ферментационной технологии и микробиологии из Лодзи в Польше были построены и испытаны три экспериментальных бескислородных биотриклиновых фильтра, содержащих различные упаковочные материалы (схематичное изображение установок представлено на слайде). Эффективность биологических пластов, содержащих полиэтиленовые элементы, керамические кольца Рашига и частицы керамзита, была исследована при очистке от сероводорода. Наибольшая эффективность была достигнута при использовании биофильтра, заполненного полиэтиленовыми элементами. Этот упаковочный материал обеспечивал наилучшие условия для иммобилизации микроорганизмов. Также наличие фосфатов в системе играло роль буфера, что убирало необходимость регулировать pH для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов. Было обнаружено, что нитрат кальция являлся подходящим акцептором электронов для процесса обессеривания газа.



Что касается очистки почвы, наиболее эффективным и нашедшим наибольшее применение является метод биоремедиации, в частности, фиторемедиация. Это метод предполагает использование зеленых растений и связанных с ними микроорганизмов для очистки сред. Данный способ широко применяется для восстановления баланса в природных экосистемах в наиболее загрязненных промышленных районах Китая, Италии, Индии, США и некоторых других государств. Для этих целей используются тополь, ива, тростник, ряска. Процесс фиторемедиации схематично представлен на слайде, его можно разложить на несколько составляющих: ризофильтрация (корни всасывают воду и химические элементы, необходимые для жизнедеятельности растений), фитостабилизация (перевод химических соединений в менее подвижную и активную форму), фитостимуляция (стимуляция развития симбиотических микроорганизмов, принимающих участие в процессе очистки), фитоэкстракция и фитоиспарение (накопление в организме растения опасных загрязнений и испарение легких элементов и излишков воды) и фиторазложение (разложение органических веществ на более простые, неопасные перерабатываемые для обеспечения жизнедеятельности растением элементы). Основную роль в процессе играют симбиотические микроорганизмы, для которых растение служит своего рода носителем-биофильтром, создавая для них среду обитания. Также распространено

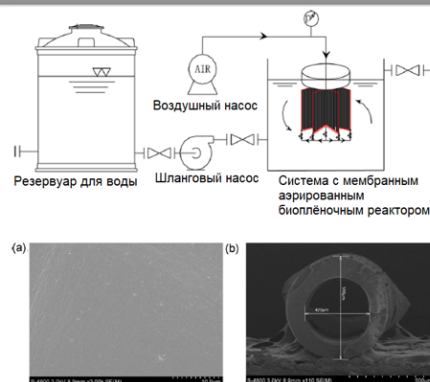


использование биочаров для стимуляции роста растений и конкретных микроорганизмов. Так, в работе итальянских учёных было продемонстрировано положительное влияние таких растений как ива, тополь, люцерна, конопля на удаление Cd, Cu, Ni, Pb и Zn из почвы в условиях жаркого и засушливого Средиземноморского климата. Каждое растение являлось эффективным специфичным фиторемедиатором для одного или нескольких тяжелых токсичных элементов.

## Биохимическая очистка вод

Сверху: схема мембранно-аэрированного биопленочного реактора; снизу: снимок СЭМ его поверхности (а) и кросс-секции (b).

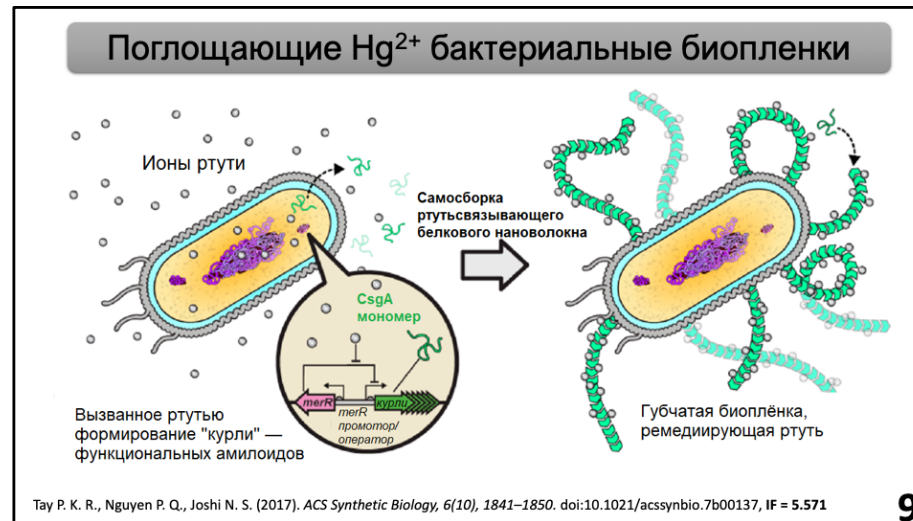
Система МАБР - инновационная технология для эффективной обработки нефтесодержащей морской воды с высокой скоростью потока. В этом исследовании рамнолипид был выбран в качестве оптимального диспергатора для значительного улучшения гидрофобности биопленки.



Li P, Zhang Y., Li M., Li B. (2015). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(51), 13009–13016.  
doi:10.1021/acs.iecr.5b03637, IF = 3.37

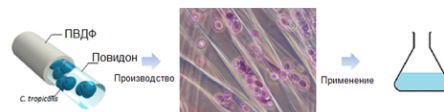
8

Также одной из наиболее серьезных экологических проблем современности является загрязнение мирового океана нефтью и её производными. Научными группами из Китая были сконструированы биореакторы (схематичное изображение представлено на слайде), наполненные специально выведенными бактериями ADB350 M, разлагающими углеводороды нефти и нефтесодержащих продуктов, которые могут плавать на поверхности воды. В них были исследованы различные ПАВы для повышения гидрофобности биопленки, их наиболее подходящие соотношения с нефтью и для эффективного удаления последней, оптимальные концентрации добавок азота и фосфора для эффективной деятельности бактерий и скорости аэрирования. Система показала свою стабильность и высокие очистные показатели в течение продолжительного эксперимента длительностью в 90 дней. Данная технология требует дальнейшего изучения и расширения для ее эффективной эксплуатации для очистки вод мирового океана.



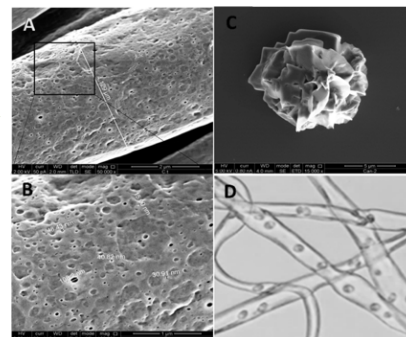
В дополнение к очистке гидросферы необходимо упомянуть о высоком уровне загрязнения тяжелыми металлами. В частности, растущее распространение антропогенного загрязнения ртутью в средах обитания и пищевых цепях становится все более острой проблемой. В работе американской научной группы рассматривается использование запрограммированных бактериальных биопленок на поглощение ртути (процесс проиллюстрирован на слайде). Демонстрируется интеграция чувствительного к ртути промотора и оперона, кодирующего самоорганизующееся нановолокно внеклеточного белка, поглощающего ртуть. Бактерии, способные реагировать на различные токсины окружающей среды путём производства биопленочных губок *in situ*, чтобы изолировать токсины в их источнике, предотвращая тем самым значительное вымывание в окружающую почву или водоемы. Эта стратегия фокусируется на связывании или секвестрации токсинов в их источнике в стабилизированной массе, улавливании токсинов в нерастворимом формате и снижении мобилизации во всей экосфере, предотвращая вымывание в очень мобильные среды (например, грунтовые воды). Эта работа открывает возможность для разработки биоремедиационных пленочных материалов, которые могут автономно работать в качестве абсорбентов тяжелых металлов.

## Биоремедиация органических загрязнителей



Использование дрожжей *Candida tropicalis* в композитных нанотрубках из бионеразлагаемых полимеров. Метод показал значительную активность при биоремедиации фенолов и накоплении этанола

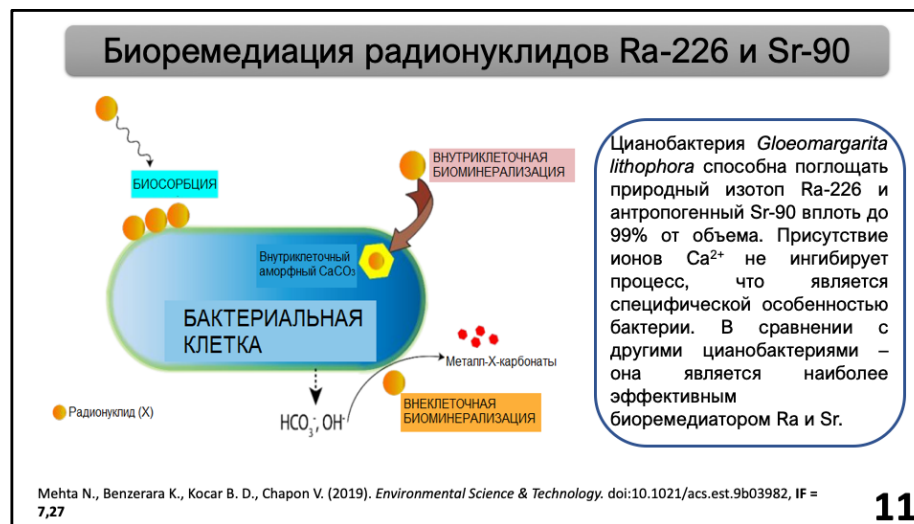
Структура и состав полимерных трубок: (A) – СЭМ-изображение поверхности трубки; (B) – топография поверхности полимера и поры; (C) – СЭМ-изображение одиночной *Candida tropicalis*; (D) – изображение нескольких дрожжей, содержащих микротрубки.



Letnik I., Avrahami R., Rokem J. S., Greiner A., Zussman E., Greenblatt C. (2015). *Biomacromolecules*, 16(10), 3322–3328.  
doi:10.1021/acs.biomac.5b00970, IF = 5,678

10

Помимо указанных ранее методов, очень перспективным является гибридный метод совмещения композитных бионеразлагаемых материалов, наполненных микроорганизмами. В совместной работе израильских и немецких исследователей предлагается использование дрожжей *Candida tropicalis* в композитных нанотрубках из бионеразлагаемых полимеров, таких как поливинилпирролидон (повидон) и поливинилиденфторид. Произведена успешная сборка нового дрожжево-полимерного композита и его демонстрация для биоремедиации. Композит с электроформованием имеет уникальную структуру, которая обеспечивает большую площадь поверхности и свободный перенос жидкости, но препятствует утечке клеток. Он может являться многообещающей платформой для создания активных микробно-полимерных систем, которые будут использоваться в очистке водных сред от различных органических поллютантов. На слайде представлена структура и состав полимерных трубок: (A) – СЭМ-изображение поверхности трубки; (B) – топография поверхности полимера и поры; (C) – СЭМ-изображение одиночной *Candida tropicalis*; (D) – изображение нескольких дрожжей, содержащих микротрубки.



Радиоактивное заражение также представляет серьёзную опасность для живых организмов. Время жизни некоторых опасных радионуклидов сопоставимо с возрастом земли, но даже ядра, имеющие период полураспада в несколько десятков или сотен лет, представляют сильную угрозу для гидросферы, почвы и, следовательно, любых живых организмов в этих средах, включая человека. Деактивация – технически сложный и весьма дорогостоящий процесс, а многие радиоактивные элементы в специальных могильниках для ядерных отходов имеют шанс попадания в сточные грунтовые воды в силу ряда причин. Также аварии на ядерных объектах (Чернобыль 1986, Фукусима 2011) всегда чрезвычайно опасны, т.к. ведут к выбросу огромного количества антропогенных радиоактивных нуклидов в окружающую среду. Так, совместная работа группы исследователей из Парижа и Массачусетса «проливает свет» на специфическую переработку радиоактивных нуклидов Ra и Sr цианобактериями *Gloeomargarita lithophora* (слайд иллюстрирует общую схему рассмотренного процесса). Сообщается о переработке до 99 процентов радиоактивных материалов с высокой скоростью, причём поглощение и переработка продолжается даже мертвой биомассой. Уникальная способность *G. lithophora* поглощать 90-Sr и 226-Ra при высоких скоростях делает его привлекательным кандидатом для дальнейших исследований, связанных с биоремедиацией этих

радионуклидов.

## Иммобилизация урана и технеция

[1]

Глицерин фосфат

U(VI)

U(IV) фосфат

Нигриинитоподобный U(IV) фосфат

Восстановление загрязненных ураном подземных вод методом биостимуляции бактериями *Pelosopus* для перевода из водорастворимого U<sup>VI</sup> в нерастворимый U<sup>IV</sup>. Выпадающий в осадок фосфатный минерал намного более устойчив к окислительной ремобилизации, чем продукты восстановления иными микроорганизмами.

[2]

Тс<sup>99</sup> – один из наиболее мобильных радионуклидов в ядерной промышленности, который составляет от 6 до 10 % ядерных отходов. Биостимуляция подземных вод для перевода из Тс<sup>VII</sup> в нерастворимый Тс<sup>IV</sup> в виде оксидов или сульфидов – отличный метод очищения вод с устойчивостью к окислительной ремобилизации.

Биостимуляция со субстратами медленного высвобождения удаляет соединения Тс(VII) из грунтовых вод

Биоматериалы с Тс (IV) не были окислены в воздухе

воздух

Тс(IV) оксид

Тс(IV) сульфид

[1] Newsome L., Morris K., Trivedi D., Bewsher A., Lloyd J. R. (2015). *Environmental Science & Technology*, 49(18), 11070–11078. doi:10.1021/acs.est.5b02042, IF = 7,27

[2] Lloyd J. R. (2017). *Environmental Science & Technology*, 51(3), 1595–1604. doi:10.1021/acs.est.6b04876, IF = 7,27

12

В ядерной промышленности отходы невыгодно перерабатывать, поэтому их утилизируют в специализированных могильниках. Такими отходами являются уран и технеций: их мобильные водорастворимые шестивалентные соединения представляют высокую угрозу для подземных вод и водоемов, в которые эти воды стекают. В данных работах (показанных на слайде) представлены методы биостимулирования для осаждения данных элементов и восстановления до степени окисления +4, которая не является мобильной в силу нерастворимости. Минералы и соединения, выпадающие в результате воздействия исследуемых бактерий на U и Tc устойчивы к окислительной ремобилизации, что делает эти методы весьма интересными и эффективными для очищения грунтовых вод от радиоактивного загрязнения.



После изучения основных биохимических методов мы провели обобщение основных достоинств и недостатков (представлены на слайде). С одной стороны, данные методы отличаются высокой эффективностью (удаление антропогенных загрязнителей может достигать 100%), безопасностью и экологической чистотой. С другой стороны, есть и существенные недостатки: высокая специфичность каждого микроорганизма, необходимость удаления излишней биомассы и большие затраты времени на выращивание культур. Эти причины являются ограничителями дальнейшего массового продвижения данного класса методов.

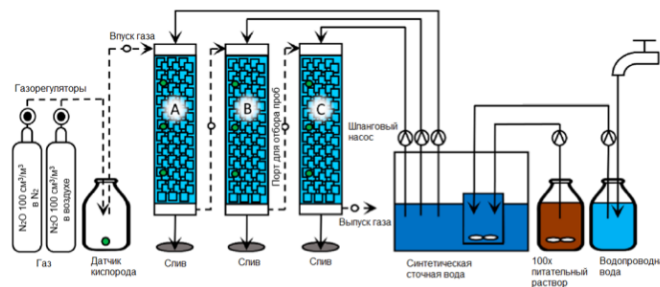




Анализируя все возможные методы очистки, которые подразделяются на химические, физико-химические, термические и биохимические, можно сказать что биохимические выгодно выделяются на фоне остальных сравнительно невысокими энергозатратами, возможностью очищать большие объемы материала и техническую простоту реализации, но на сегодняшний день они нереализуемы при высоких и критических уровнях загрязнения, что требует их дальнейшего исследования.

## Будущее биохимических методов

Серийные системы по очистке воздуха, почвы, гидросферы без необходимости значительных энергозатрат, удаления большого количества вторичных отходов, эффективные при любом уровне загрязнения, которые будут безопасны для окружающей среды



Yoon H., Song M. J., Kim D. D., Sabba F., Yoon S. (2019). *Environmental Science & Technology*. doi:10.1021/acs.est.8b05924, IF = 7,27

15

Будущее же этих методов заключается в расширении и углублении имеющихся материалов, внедрении на муниципальные очистные сооружения и повышении их доли среди других методов очистки. Со времен промышленной революции человечество сильно продвинулось вперед в научно-техническом плане, что в свою очередь является причиной непомерного загрязнения планеты. Реализация экспериментальных установок и их серийное производство – ключ к сохранению природного баланса. На слайде представлена разработанная учёными из Южной Кореи и США перспективная технологическая схема очистки сточных вод с использованием биофильтров.

## Выводы

- Биохимические методы являются эффективными и экологически безопасными для очищения воздуха, почвы и гидросферы
- Необходимо проведение дополнительных исследований возможностей биоремедиации, биостимулирования и биофильтрации для создания универсальных и экономически выгодных систем очистки

**16**

В заключение, необходимо сказать, что применение биохимических методов является весьма эффективным и экологически безопасным способом для очищения воздуха, почвы и гидросферы, что требует проведения дополнительных исследований по биоремедиации, биостимулированию и биофильтрации для создания более универсальных и экономически выгодных систем очистки.

## Используемая литература

1. López de León L. R., Deaton K. E., Deshusses M. A. (2018). *Environmental Science & Technology*. IF = 7,27
2. Ziemiński K., Kopycki W. J. (2016). *Energy & Fuels*, 30(11), 9386–9395. IF = 3,277
3. Guidi Nissim W., Palm E., Mancuso S., Azzarello E. (2018). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 9114–9131. IF = 2.914
4. Li P., Zhang Y., Li M., Li B. (2015). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(51), 13009–13016. IF = 3.37
5. Tay P. K. R., Nguyen P. Q., Joshi N. S. (2017). *ACS Synthetic Biology*, 6(10), 1841–1850. IF = 5.571
6. Letnik I., Avrahami R., Rokem J. S., Greiner A., Zussman E., Greenblatt C. (2015). *Biomacromolecules*, 16(10), 3322–3328. IF = 5,678
7. Mehta N., Benzerara K., Kocar B. D., Chapon V. (2019). *Environmental Science & Technology*. IF = 7,27
8. Newsome L., Morris K., Trivedi D., Bewsher A., Lloyd J. R. (2015). *Environmental Science & Technology*, 49(18), 11070–11078. IF = 7,27
9. Lloyd J. R. (2017). *Environmental Science & Technology*, 51(3), 1595–1604. IF = 7,27
10. Yoon H., Song M. J., Kim D. D., Sabba F., Yoon S. (2019). *Environmental Science & Technology*. IF = 7,27

17

На данном слайде представлен список литературы, использованной при подготовке доклада. Спасибо за внимание!