

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ БИОПАВ НА ПРОЦЕССЫ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОДНЫХ СРЕД

Чердакова А. С., Гальченко С. В., Воробьева Е. В.

RESULTS OF THE EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE BIOSURFACTANT INFLUENCE ON THE PROCESSES OF MICROBIOLOGICAL REMEDIATION OF OIL-POLLUTED AQUATIC ENVIRONMENTS

Cherdakova A. S., Galchenko S. V., Vorob'eva E. V.

Аннотация

Введение. Биотехнологические способы ремедиации водных сред от нефтеуглеводородного загрязнения позволяют значительно сократить время их восстановления, не нарушая при этом свойства экосистем и не вызывая угрозы вторичного загрязнения. Гуминовые вещества, проявляя поверхностно-активные свойства, стимулируют активность микробиодеструкторов нефтяных углеводородов, в значительной степени повышают результативность ремедиационных мероприятий. Были проведены экспериментальные исследования в целях определения влияния биоПАВ на основе гуминовых веществ на процессы микробиологической ремедиации водных сред, загрязненных различными нефтепродуктами. **Методы.** В модельном эксперименте вода была загрязнена бензином и дизельным топливом. Для ремедиации были использованы товарные гуминовые препараты, полученные из различных видов сырья и по различным технологиям: «Экорост», «Биогумус». Внесение гуминовых веществ осуществлялось совместно с нефтеокисляющим биопрепаратом «Дестройл». **Результаты.** Интенсивность процессов биодеградации и диспергирования пленки нефтепродуктов на водной поверхности при совместном применении гуминовых и микробиопрепаратов зависит как от вида нефтепродукта, так и от свойств гуминового препарата, а также его концентрации. **Заключение.** Полученные результаты указывают на возможность совместного использования нефтеокисляющей микрофлоры и гуминовых препаратов в целях повышения эффективности биоремедиации водных сред.

Ключевые слова: гуминовые препараты, загрязнение воды нефтепродуктами, бензин, дизельное топливо, ремедиация, микроорганизмы.

Abstract

Introduction. Biotechnological methods for the remediation of aquatic environments from oil hydrocarbon pollution can significantly reduce the time of their recovery, without disturbing ecosystems or causing the threat of secondary pollution. Showing surface-active properties, humic substances stimulate the activity of microbiodestructors of oil hydrocarbons; significantly increase the effectiveness of remediation measures. The authors performed experimental studies to determine the influence of biosurfactants based on humic substances on the processes of microbiological remediation of aquatic environments contaminated with various oil products. **Methods.** In a model experiment, the water was polluted with gasoline and diesel fuel. For remediation, commercial humic preparations were used, obtained from various types of raw materials, using various technologies: Ekorost, Biohumus. The humic substances were introduced together with the Destroil oil-oxidizing biopreparation. **Results.** The intensity of biodegradation and dispersion of an oil product film on the water surface with the combined use of humic and microbiological preparations depends both on the type of oil product and properties of the humic preparation, as well as its concentration. **Conclusion.** The results suggest a possibility of using a combination of oil-oxidizing microflora and humic preparations in order to enhance the effectiveness of aquatic environments' bioremediation.

Keywords: humic preparations, water pollution with oil products, gasoline, diesel fuel, remediation, microorganisms.

Введение

В настоящее время проблема масштабного загрязнения всех компонентов окружающей среды, в том числе и водной, нефтью и продуктами ее переработки стоит как никогда остро как

в России, так и в других странах мира. Причина этого — ежегодно нарастающие объемы добычи нефти, производство и использование нефтепродуктов, возникающие техногенные аварии при эксплуатации трубопроводов, промышленных

объектов и транспорта. Ситуация усугубляется тем, что самоочищение загрязненных углеводородами сред является сложнейшим, многофакторным процессом и происходит крайне медленно. Деструкция этих загрязнителей в природных средах требует длительного времени и без вмешательства человека практически невозможна.

Анализ данных, приведенных в научной литературе, показал, что для восстановления нефтезагрязненных вод применение лишь механических и физико-химических методов не всегда приемлемо и результативно из-за их низкой эффективности, высокой трудоемкости и стоимости, а кроме того, возможно вторичное загрязнение и нарушение функционирования компонентов экосистем. В настоящее время научно доказана перспективность применения для этих целей микробиологических нефтеокисляющих ремедиаторов [3, 8, 10, 17, 18, 19].

Биотехнологические способы ремедиации водных сред от углеводородного загрязнения позволяют значительно сократить время восстановления, не нарушая при этом свойства экосистем и не вызывая угрозы вторичного загрязнения. На данный момент для этой цели разработаны и производятся различные биопрепараты, предназначенные для очистки природных и сточных вод от нефти и нефтепродуктов. Но, учитывая тенденцию к увеличению масштабов загрязнения окружающей среды нефтяными углеводородами, необходимо провести научный поиск новых механизмов стимулирования действия микробиодеструкторов на процессы разложения опасных веществ, основанных на «зеленых» технологиях.

В указанном аспекте максимально эффективно использование диспергантов, проявляющих поверхностно-активные свойства и способствующих разрыву углеводородной пленки на отдельные сферические структуры. При этом площадь активного взаимодействия микроорганизмов с питательным субстратом будет существенно увеличиваться. Применяемые в настоящее время химические дисперганты часто токсичны для окружающей среды и могут служить источником ее вторичного загрязнения. Экологически безопасную альтернативу им представляют биологические поверхностно-активные вещества

(биоПАВ), среди которых наиболее перспективны гуминовые вещества, чьи свойства обусловлены амфифильным характером их строения, т. е. наличием в структуре гидрофобных (ароматический каркас) и гидрофильных компонентов (периферическая часть). Благодаря этому они способны адсорбироваться на поверхности раздела фаз «нефть-вода», снижая поверхностное натяжение и препятствуя коалесценции капель нефти или нефтепродукта. Данный процесс как раз и приводит к увеличению площади удельной поверхности капель нефтепродуктов и росту их доступности для микроорганизмов-деструкторов [1, 5, 11]. Кроме того, гуминовые вещества обладают выраженными детоксицирующими свойствами, могут служить источником крайне необходимых для нефтеокисляющих микроорганизмов биогенных элементов (азот, фосфор и др.) и положительно влияют на важные для их функционирования свойства очищаемых водных сред (рН, окислительно-восстановительные условия и др.). Тем самым гуминовые вещества способствуют формированию благоприятных условий для «работы» микробиоремедиаторов.

Приводимые в научной литературе исследования посвящены процессам ремедиации водных сред, загрязненных в основном сырой нефтью [11, 12, 14]. Но практически не освещены остаются вопросы биодеструкции отдельных типов нефтепродуктов, как легких (бензины, керосины), так и тяжелых (дизельные топлива, мазуты, битумы), которые характеризуются различными физико-химическими свойствами, токсичностью и поведением в окружающей среде.

В этой связи исследования, направленные на изучение фундаментальных основ применения гуминовых веществ в биоремедиации водных сред, загрязненных конкретными нефтепродуктами, приобретают особую значимость и актуальность.

Исходя из вышеперечисленных аспектов нами были проведены экспериментальные исследования для определения влияния биоПАВ на основе гуминовых веществ на процессы микробиологической ремедиации водных сред, загрязненных различными нефтепродуктами.

Методы и материалы

Современные гуминовые препараты широко представлены на потребительском рынке и из-за

уникальных свойств нашли масштабное применение в различных направлениях [4]. В наших исследованиях были использованы товарные гуминовые препараты, полученные из различных видов сырья и по различным технологиям, характеристика которых представлена в табл. 1.

Используемые в эксперименте препараты существенно различаются как по содержанию активного компонента — гуминовых и фульвокислот, так и по концентрации соединений минеральных элементов, а также значениям pH. Так, для выделенного из вермикомпоста препарата «Биогумус» характерно невысокое содержание гуминовых веществ (3 г/л), но при этом он обогащен основными минеральными компонентами. Полученный из торфа «Экорост», напротив, отличается большей концентрацией соединений гуминовых веществ (70 г/л), но по сравнению с препаратом «Биогумус» имеет более низкое содержание фосфора и почти в два раза большее содержание общего калия.

Немаловажную роль играет и технология производства препаратов. Так, применение технологии гидродинамической кавитации позволяет значительно эффективней извлекать гуминовые компоненты из сырья по сравнению с щелочной экстракцией. Данное явление объясняется рядом физико-химических процессов, являющихся следствием кавитационных эффектов (разрыв связей в макромолекулах, разрушение адсорбционных комплексов, диспергирование, эмульгирование, окисление, растворение, экстрагирование и др.), возникающих при прохождении гидродинамической волны через сырьевую суспензию.

Таблица 1

Основные характеристики экспериментальных гуминовых препаратов

Показатель*	Название препарата	
	«Биогумус»	«Экорост»
Сырье	Вермикомпост	Торф
Технология получения	Щелочная экстракция	Гидродинамическая кавитация
pH, ед. pH	8,5	7,0
Гуминовые и фульвокислоты, г/л	3,0	70,0
Азот общий, г/л	3,0	2,8
Фосфор общий, г/л	3,0	0,01
Калий общий, г/л	3,0	5,8

*По данным производителя.

Кроме того, исключение щелочи из технологического процесса при кавитационной обработке дает возможность получать препараты с нейтральной и слабощелочной реакцией среды, тогда как препараты, произведенные традиционным экстрагированием, имеют щелочную реакцию среды.

Предметом исследования являлись наиболее распространенные нефтепродукты — загрязнители водной среды различных фракций: бензин АИ-95 (легкая фракция) и дизельное топливо (средняя фракция).

В основу экспериментальных исследований была положена методика, разработанная в НИИ Биологии при Иркутском государственном университете профессором Д. И. Стомом с соавторами и модифицированная нами. Данная методика основана на цифровой визуализации процессов биодеструкции пленки нефтепродуктов [5].

При постановке модельного лабораторного эксперимента в чашки Петри вносили 30 мл анализируемых гуминовых препаратов в виде 0,01 %, 0,1 % и 1 % водных растворов и добавляли с помощью пипетки каплю исследуемого нефтепродукта. В качестве источника нефтеокисляющих микроорганизмов применялся биопрепарат «Дестройл», представляющий собой культуру штамма *Acinetobacter species JN-2*. Это неспоровые, неподвижные, грамотрицательные бактерии, обладающие высокой способностью к биодеструкции нефтяных углеводородов. Дестройл применяли на всех вариантах опыта в виде суспензии согласно инструкции.

Контролем в опыте служили чашки Петри с дистиллированной водой (30 мл), на поверхность которых также наносили каплю нефтепродуктов и обрабатывали суспензией биопрепарата. Оценку состояния капель нефтепродуктов проводили ежедневно в течение месяца. Повторность в эксперименте — четырехкратная. Схема эксперимента представлена в табл. 2.

Для обработки полученных данных, расчета удельной поверхности капель нефтепродуктов использовалась специальная компьютерная программа (написанная нами на языке программирования C# в интегрированной среде разработки программного обеспечения Visual Studio 2013 Professional). Эта программа позволяет провести бинаризацию цифровых изображений динамики процессов биодеструкции пленки нефтепродук-

тов в эксперименте и провести автоматизированный расчет площади удельной поверхности капель нефтепродуктов при разрушении их пленки на отдельные элементы.

Результаты исследования и обсуждение

Полученные в ходе эксперимента результаты существенным образом варьировали в зависимости от типа вносимого нефтепродукта. По этой причине опишем динамику наблюдаемых процессов деструкции пленки нефтепродуктов отдельно для каждого из них.

Наиболее выражены свои свойства как биоПАВ гуминовые препараты проявили по отношению к бензину. Так, на всех вариантах опыта с использованием гуминовых веществ наблюдалось интенсивное диспергирование пленки данного нефтепродукта. Проведенная методом цифровой визуализации количественная оценка степени разрушения пленки бензина показала существенное изменение суммарной длины границ капель нефтепродукта на экспериментальных образцах по сравнению с контролем (рис. 1).

Таблица 2

Схема эксперимента по оценке динамики диспергирования нефтепродуктов при совместном использовании гуминовых и микробиопрепаратов

Название препарата	Концентрация препаратов, %	Условное обозначение
Бензин		
«Биогумус»	0,01	ББ 0,01
	0,1	ББ 0,1
	1,0	ББ 1,0
«Экорост»	0,01	ЭБ 0,01
	0,1	ЭБ 0,1
	1,0	ЭБ 1,0
Контроль	–	КБ
Дизельное топливо		
«Биогумус»	0,01	БД 0,01
	0,1	БД 0,1
	1,0	БД 1,0
«Экорост»	0,01	ЭД 0,01
	0,1	ЭД 0,1
	1,0	ЭД 1,0
Контроль	–	КД

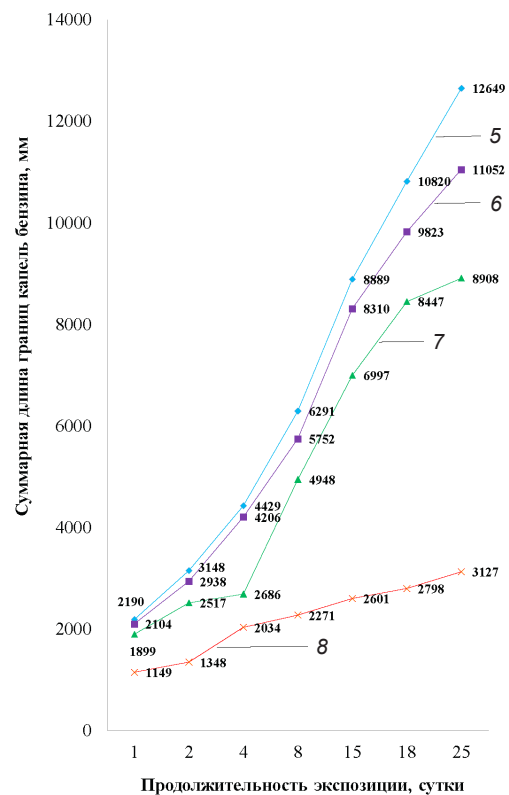
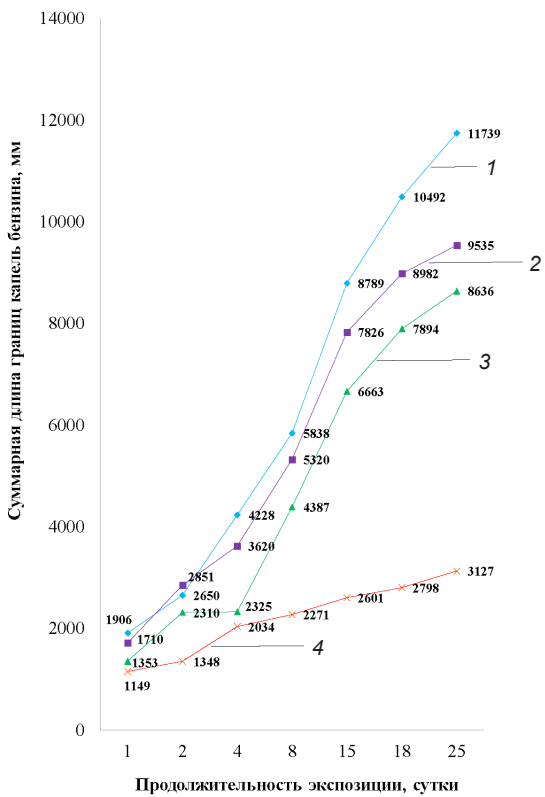


Рис. 1. Динамика изменения суммарной длины границ капель бензина на водных растворах гуминовых препаратов по средним значениям: 1 — ББ 0,01; 2 — ББ 0,1; 3 — ББ 1; 4, 8 — КБ; 5 — ЭБ 0,01; 6 — ЭБ 0,1; 7 — ЭБ 1,0

Для более точного анализа рассмотрим наблюдаемые процессы в динамике. При закладке эксперимента бензин на поверхности всех экспериментальных образцов образовал равномерную пленку с четкими краями (рис. 2).

В первые сутки наблюдений отмечается минимальная суммарная длина границ капель за весь период эксперимента. Протекания процессов диспергирования пленки нефтепродуктов не наблюдалось.

Начиная со вторых суток на вариантах опыта с использованием 0,01 %-ного водного раствора гуминовых препаратов начинают появляться разрывы, что характерно как для препарата «Биогумус», так и «Экорост». В течение последующих трех суток данная тенденция проявляется все более четко, что выражается в увеличении суммарной длины границ капель бензина на данных вариантах опыта более чем в два раза (рис. 3).

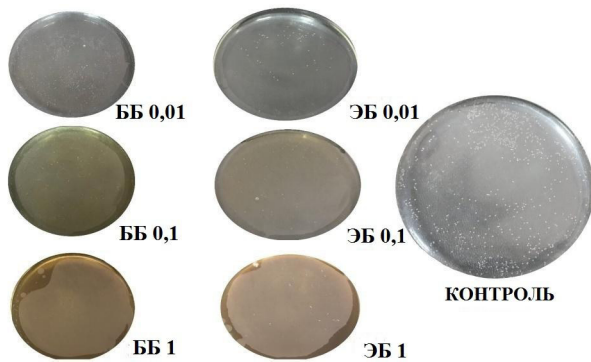


Рис. 2. Состояние экспериментальных образцов в первые сутки экспозиции

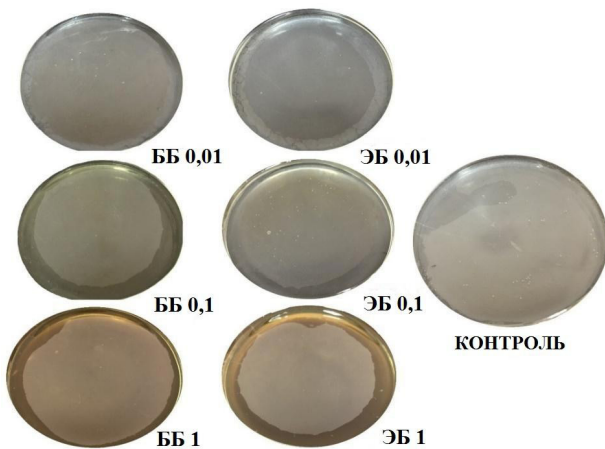


Рис. 3. Состояние экспериментальных образцов на вторые сутки экспозиции

За период с четвертых по восьмые сутки эксперимента на вариантах опыта с использованием 0,01 %-ного водного раствора «Экорост» большая часть поверхности пленки бензина распалась на мелкие структурные отдельности, в результате чего суммарная длина границ капель возросла в полтора раза. На препарате «Биогумус» такой же концентрации данный процесс был несколько менее выражен. За указанный период процессы диспергирования стали углубляться и на 0,1 %-ных водных растворах препаратов. Гуминовые препараты в дозе 1 %-ных водных растворов проявляли минимальные диспергирующие свойства по сравнению с другими концентрациями. Но и здесь отмечалось увеличение изрезанности краев пленки бензина, в результате чего и на препаратах «Экорост» и «Биогумус» длина ее границы увеличилась почти в два раза (рис. 4).

На 15–18-е сутки процессы диспергирования пленки бензина продолжали углубляться на всех вариантах опыта. Но по-прежнему сохранились ранее указанные отличия как между препаратами, так и между концентрациями одного препарата. Именно на данном этапе наблюдалась наиболее выраженная разница между опытными и контрольными образцами. Так, суммарная длина границ капель бензина на контроле была в 2,5 раза меньше чем на 1 %-ном растворе «Биогумус» и в 4 раза меньше чем на 0,01 %-ном растворе препарата «Экорост» (рис. 5).

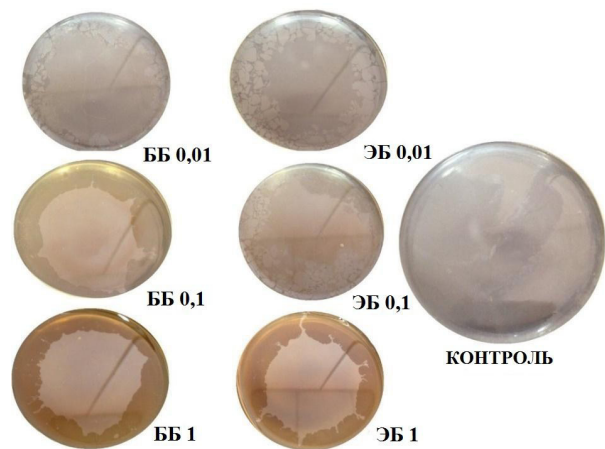


Рис. 4. Состояние экспериментальных образцов на восьмые сутки экспозиции

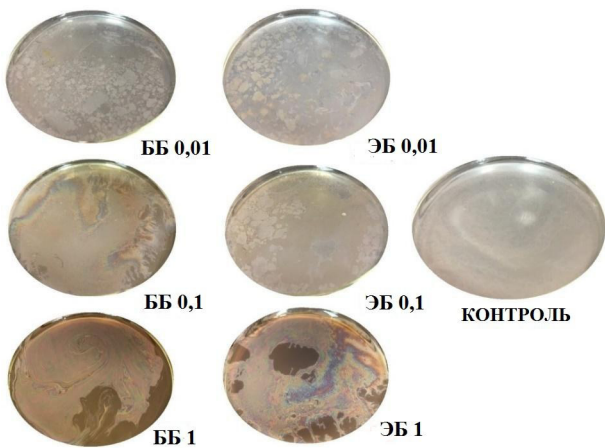


Рис. 5. Состояние экспериментальных образцов на 18-е сутки экспозиции

К 25-м суткам процесс диспергирования пленки бензина достиг своего максимума при сохранении вышеописанных тенденций (рис. 6).

Таким образом, интенсивность процесса диспергирования бензина существенным образом зависела как от применявшегося гуминового препарата, так и от его концентрации.

Как более активное биоПАВ проявил себя препарат «Экорост». Так, значения суммарной длины границ капель бензина в эксперименте на всех вариантах с его использованием превышают таковые на аналогичных концентрациях препарата «Биогумус».

В отношении анализируемых препаратов гуминовых веществ выявлена отчетливая тенденция снижения их диспергирующих свойств

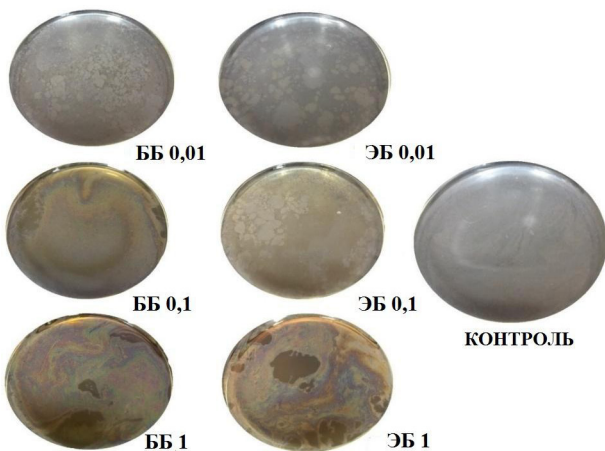


Рис. 6. Состояние экспериментальных образцов на 25-е сутки экспозиции

по отношению к бензину в водной среде с увеличением концентрации. Таким образом, наиболее интенсивно как биоПАВ гуминовые препараты проявили себя при использовании в виде 0,01 %-ных водных растворов.

Состояние пленки бензина на контрольном варианте опыта изменялось несущественно в течение всего эксперимента. Как было отмечено, значения суммарной длины границ капель бензина на контроле были в несколько раз ниже по сравнению с таковыми на гуминовых препаратах. Таким образом, обработка загрязненной бензином водной среды только микробиоремедиаторами без внесения гуминовых препаратов не привела к значимому диспергированию пленки нефтепродукта.

На вариантах опыта с модельным загрязнением водной среды дизельным топливом активного протекания процессов диспергирования пленки нефтепродукта не отмечено. Но на 1%-ном растворе препарата «Биогумус», начиная с пятых суток эксперимента, визуально наблюдался активный рост колоний нефтеокисляющей микрофлоры (штамма *Acinetobacter species JN-2*).

К концу эксперимента (на 25-е сутки) под воздействием выросших колоний пленка дизельного топлива была почти полностью утилизирована (рис. 7).

Приводимые на данный момент в научной литературе немногочисленные сведения относительно рассматриваемого вопроса свидетельствуют о том, что гуминовые вещества могут оказывать различное влияние на микроорганизмы, причем спектр данного влияния варьирует от стимулирования роста и активности до их полного ингибирования [2, 11, 12, 13, 14, 16, 21]. Направленность и выраженность указанных процессов зависит от свойств и концентрации гуминовых веществ, видовых особенностей микроорганизмов, характеристик среды и др.

По нашему мнению, наблюдаемое ингибирование нефтеокисляющей микрофлоры в условиях загрязнения водной среды дизельным топливом под воздействием препарата «Экорост» и, напротив, стимулирование ее роста на 1 %-ных растворах препарата «Биогумус» обусловлено совокупным влиянием следующих факторов.

Во-первых, существенное воздействие на рассматриваемые процессы оказывает концент-

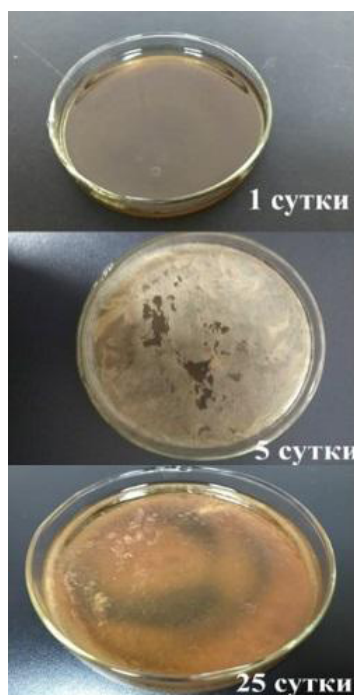


Рис. 7. Динамика процессов биодegradации пленки дизельного топлива на вариантах опыта с использованием 1 %-ного водного раствора препарата «Биогумус»

рация гуминовых и фульвокислот в препаратах. Как известно, гуминовые вещества проявляют бактерицидные свойства, следовательно, выраженность данных свойств будет зависеть от их концентрации в препарате, по причине чего более концентрированный препарат «Экорост» препятствовал активному развитию нефтеокисляющей микрофлоры.

Во-вторых, определенную роль играет и молекулярная структура гуминовых веществ, которая во многом определяется источником их получения. Так, гуминовые вещества способны к связыванию и сорбции нефтяных углеводородов и, соответственно, снижению их доступности для нефтеокисляющей микрофлоры. Сорбционные свойства гуминовых веществ по отношению к углеводородам напрямую зависят от содержания в их структуре ароматических гидрофобных компонентов [11, 22]. Молекулярная структура торфяных гуминовых веществ более ароматична по сравнению с гуминовыми веществами, выделенными из вермикомпостов [7]. В этой связи гуминовые вещества в составе полученного из торфа препарата «Экорост» ввиду сорбционного взаимодействия с углеводородами дизельно-

го топлива могли препятствовать доступу к ним микроорганизмов-деструкторов.

В-третьих, интенсивность развития нефтеокисляющих микроорганизмов напрямую зависит от концентрации в среде элементов минерального питания, в результате чего активный рост колоний *Acinetobacter species JN-2* отмечался именно на вариантах опыта с использованием более обогащенного питательными элементами препарата «Биогумус».

Полученные нами данные подтверждают результаты других аналогичных исследований. Так, многими зарубежными авторами показана прямая зависимость между концентрацией гуминовых веществ и их ингибирующим воздействием на активность нефтеокисляющей микрофлоры [9, 13, 20]. В работах Y. Liang и др. отмечено, что гуминовые вещества демонстрируют выраженные поверхностно-активные свойства по отношению к углеводородам и в небольших концентрациях активизируют деятельность микробиодеструкторов. Но при повышении концентрации гуминовых веществ их стимулирующий эффект снижается и в высоких дозах они практически полностью подавляют деятельность микрофлоры [13]. R. Shimp также указывает на снижение интенсивности метаболических процессов у представителей углеводородокисляющих микроорганизмов при воздействии высоких концентраций гуминовых веществ [20].

Зависимость между степенью проявления гуминовыми веществами бактерицидных свойств и источником их получения продемонстрирована в исследованиях сотрудников МГУ имени М. В. Ломоносова [21]. Препараты угольных гуминовых веществ оказывали токсическое действие на бактериальные культуры во всем диапазоне концентраций, тогда как гуминовые вещества, выделенные из органических отходов, напротив, даже в самых высоких концентрациях не проявили ингибирующего эффекта по отношению к бактериям. Авторы объясняют такие результаты спецификой молекулярной структуры гуминовых веществ, полученных из различных источников. По их мнению, гуминовые вещества, выделенные из менее гумифицированного сырья (сапрпель, органические отходы), ввиду специфики молекулярной структуры менее токсичны и стимулируют активность микроорганизмов.

Многие авторы отмечают высокую отзывчивость микроорганизмов на стимулирование деятельности элементами минерального питания [6, 9, 15, 21]. Так, в ряде исследований показано, что при повышении насыщенности среды питательными элементами с 2 до 25 % нивелировалось токсичное действие гуминовых веществ по отношению к микроорганизмам и существенно активизировался их рост [6, 9].

Таким образом, в эксперименте показано, что стимуляции процессов биоутилизации нефтеокисляющими микроорганизмами дизельного топлива в водной среде способствует сочетание небольших концентраций низкоароматичных гуминовых веществ и повышенного содержания питательных элементов. Однако ввиду сложности и многофакторности указанных процессов для установления конкретных закономерностей требуется проведение дальнейших исследований.

Заключение

Характер и направленность влияния гуминовых веществ как биоПАВ на процессы микробиологической ремедиации водных сред, загрязненных нефтепродуктами в первую очередь, зависят от вида нефтепродукта.

Так, по отношению к бензину в водной среде гуминовые вещества проявили выраженные поверхностно-активные свойства. Под их воздействием наблюдалось активное протекание процессов диспергирования пленки бензина на водной поверхности, интенсивность которых варьировала в зависимости от применяемого гуминового препарата и его концентрации. Глубина процессов диспергирования на препарате «Экорост» была больше, чем на препарате «Биогумус». Выявлена четкая обратная зависимость между концентрацией гуминового препарата и степенью проявления его диспергирующих свойств: чем выше концентрация препарата, тем ниже интенсивность диспергирования. Таким образом, максимальной деструкции пленка бензина была подвержена на 0,01 %-ных водных растворах препаратов, а минимальной — на 1 %-ных растворах.

В отношении дизельного топлива гуминовые вещества диспергирующих свойств не проявили. Но препарат «Биогумус» в дозе 1 %-ного водного раствора способствовал бурному росту колоний нефтеокисляющей микрофлоры (штамма *Acinetobacter species JN-2*), что привело к полной

биоутилизации пленки дизельного топлива на данных вариантах опыта к моменту окончания эксперимента (25 суток экспозиции). Основываясь на имеющемся мировом научном опыте и результатах ранее проведенных исследований, предполагаем, что стимулирование микробиодеструкторов препаратом «Биогумус» в указанной концентрации обусловлено сочетанным действием ряда факторов: концентрации гуминовых веществ, специфики молекулярной структуры и содержания главных элементов минерального питания (N, P, K). Повышенные концентрации гуминовых веществ, обладающие бактерицидным действием, их значительная ароматичность и дефицит питательных элементов могут ингибировать деятельность микроорганизмов, в том числе нефтеокисляющих. В этой связи активное развитие микрофлоры отмечено именно на препарате «Биогумус», характеризующемся невысокими концентрациями низкоароматичных (ввиду специфики применяемого сырья — вермикомпоста) гуминовых веществ и повышенным содержанием минеральных компонентов, по сравнению с препаратом «Экорост», который подобного эффекта не оказывал.

Полученные результаты указывают на возможность совместного использования нефтеокисляющей микрофлоры и гуминовых препаратов в целях биоремедиации водных сред, загрязненных различными нефтепродуктами. Но для разработки научно-обоснованного базиса подобных технологий требуется проведение дальнейших исследований в данном направлении.

Финансирование

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Рязанской области № 18-45-623003 р_мол_а «Исследование влияния биоПАВ на основе гуминовых веществ на процессы микробиологической ремедиации природных сред, загрязненных нефтепродуктами».

Литература

1. Гальченко, С. В., Спиридович, Д. В. и Чердакова, А. С. (2015). Результаты экспериментальной оценки влияния гуминовых препаратов на процессы диспергирования нефтепродуктов. Научное обозрение, № 1, сс. 126–130.
2. Демин, В. В., Завгородняя Ю. А. и Терентьев, В. А. (2006). Природа биологического действия гуминовых

веществ. Часть 1. Основные гипотезы. Доклады по экологическому почвоведению, Т. 1, № 1, сс. 72–79.

3. Морозов, Н. В. и Сидоров, А. В. (2007). Нефтяное загрязнение в поверхностных водах и методы их биоремедиации. Вода и экология: проблемы и решения, № 3 (32), сс. 31–38.

4. Пурыгин, П. П., Потапова, И. А. и Воробьев, Д. В. (2014). Гуминовые кислоты: их выделение, структура и применение в биологии, химии и медицине. В: Актуальные проблемы биологии, химии и медицины, Одесса: Куприенко С.В., сс. 180–196.

5. Стом, Д. И., Казаринов, С. В. и Балаян, А. Э. (2005). Действие препаратов гуминовых веществ и нефтеокисляющих микроорганизмов на состояние капель углеводородов. Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН, № 6 (44), сс. 166–168.

6. Федосеева, Е. В., Терехова, В. А., Якименко, О. С. и Гладкова, М. М. (2009). Экотоксикологическая оценка гуминовых препаратов разного происхождения с применением микроводорослей *Scenedesmus quadricauda*. Теоретическая и прикладная экология, № 4, сс. 45–49. DOI: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049.

7. Чердакова, А. С. (2017). Экологическая оценка влияния различных гуминовых препаратов на состояние техногенно-измененных серых лесных почв. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М.: Российский университет дружбы народов.

8. Atlas, R. M., Hazen, T. C. (2011). Oil biodegradation and bioremediation: a tale of the two worst spills in U.S. history. *Environmental Science & Technology*, No. 45 (16), pp. 6709–6715. DOI: 10.1021/es2013227.

9. Bešković, V. P., Milic, J. S., Gojčić-Cvijović, G. D., Ilic, M. V., Miletić, S. B., Jovančićević, B. S. and Vrvic, M. M. (2012). Bioremediation of soil polluted with crude oil and its derivatives: Microorganisms, degradation, pathways, technologies. *Hemijaska Industrija*, No. 66 (2), pp. 275–289. DOI: 10.2298/HEMIND110824084B.

10. Brown, L. D., Gee, K. F., Cologgi, D. L. and Ulrich, A. C. (2017). Bioremediation of oil spills on land. In: Fingas, M. (ed.) *Oil Spill Science and Technology*, 2nd edition. Houston: Gulf Professional Publishing, pp. 699–729.

11. Grechishcheva, N. Yu., Meshcheryakov, S. V., Perminova, I. V. and Kholodov, V. A. (2017). Stabilization of oil-in-water emulsions by highly dispersed particles: Role in self-cleaning processes and prospects for practical application. *Russian Journal of General Chemistry*, Vol. 87, pp. 2166–2180. DOI: 10.1134/S1070363217090432.

12. Ivanov, A. A., Yudina, N. V., Mal'tseva, E. V., Matis, E. Ya. and Svarovskaya, L. I. (2010). Stimulation of the activity of microorganisms by humin preparations in oil-polluted soils. *Eurasian Soil Science*, Vol. 43, pp. 210–215. DOI: 10.1134/S1064229310020110.

13. Liang, Y, Britt, D. W., McLean, J. E., Sorensen, D. L. and Sims, R. C (2007). Humic acid effect on pyrene degradation: finding of an optimal range for pyrene solubility and mineralization enhancement. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 74, Issue 6, pp. 1368–1375. DOI: 10.1007/s00253-006-0769-8.

14. Lipezynska-Kochany, E. (2018). Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations

of organic pollutants in water and soil. *Chemosphere*, Vol. 202, pp. 420–437. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.104.

15. Liu, Q., Tang, J., Gao, K., Gurav, R. and Giesy, J. P. (2017). Aerobic degradation of crude oil by microorganisms in soils from four geographic regions of China. *Scientific Reports*, No. 7, 14856. DOI: 10.1038/s41598-017-14032-5.

16. Ortega-Calvo, J. J. and Saiz-Jimenez, C. (1998). Effect of humic fractions and clay on biodegradation of phenanthrene by a *Pseudomonas fluorescens* Strain isolated from soil. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 64, No. 8, pp. 3123–3126. DOI: 10.1128/AEM.64.8.3123-3126.1998.

17. Rodrigues, E. M., Kalks, K. H. and Tótoła, M. R. (2015). Prospect, isolation, and characterization of microorganisms for potential use in cases of oil bioremediation along the coast of Trindade Island, Brazil. *Journal of Environmental Management*, Vol. 156, pp. 15–22. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.03.016.

18. Saini, H. and Arya, I. D. (2016). Bioremediation of oil polluted soil: Effect on hill bamboo (*Drepanostachyum falcatum*) plant emergence and height. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, Vol. 8(6), pp. 46–52. DOI: 10.5897/JABSD2016.0269.

19. Sakthipriya, N., Doble, M. and Sangwai, J. S. (2015). Bioremediation of coastal and marine pollution due to crude oil using a microorganism *Bacillus subtilis*. *Procedia Engineering*, Vol. 116, pp. 213–220. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.284.

20. Shimp, R. and Pfaender, F. K. (1985). Influence of naturally occurring humic acids on biodegradation of monosubstituted phenols by aquatic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 49, Issue 2, pp. 402–407.

21. Yakimenko, O. S. and Terekhova, V. A. (2011). Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes. *Eurasian Soil Science*, Vol. 44, No. 11, pp. 1222–1230. DOI: 10.1134/S1064229311090183.

22. Yang, Y., Shu, L., Wang, X., Xing, B. and Tao, S. (2012). Mechanisms regulating bioavailability of phenanthrene sorbed on a peat soil-origin humic substance. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1431–1437. DOI: 10.1002/etc.1844.

References

1. Galchenko, S. V., Spiridovich, D. V. and Cherdakova, A. S. (2015). Results of experimental assessment of the influence of humic preparations on the processes of petroleum products dispersion. *Scientific Review*, No. 1, pp. 126–130.

2. Demin, V. V., Zavgorodnyaya, Yu. A. and Terentyev, V. A. (2006). Nature of the biological action of humic substances. Part 1. Main hypotheses. *Interactive Journal of Ecological Soil Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 72–79.

3. Morozov, N. V. and Sidorov, A. V. (2007). Oil pollution in surface waters and their bioremediation methods. *Water and Ecology*, No. 3 (32), pp. 31–38.

4. Purygin, P. P., Potapova, I. A. and Vorobyev, D. V. (2014). Humic acids: their isolation, structure and application in biology, chemistry and medicine. In: Challenging issues of biology, chemistry and medicine. Odessa: Kuprienko Sergey, pp. 180–196.

5. Stom, D. I., Kazarinov, S. V. and Balajan, A. E. (2005). Influence of humic substances and oil-degrading microorganisms upon condition of hydrocarbon drops. *Bulletin of the East Siberian Center of the Siberian Branch of the Russian*

Academy of Sciences, No. 6 (44), pp. 166–168. Fedoseeva, E. V., Terekhova, V. A., Yakimenko, O. S. and Gladkova, M. M. (2009). Ecotoxicological evaluation of commercial humates of different origin using microalgae *Scenedesmus quadricauda*. *Theoretical and Applied Ecology*, No. 4, pp. 45–49. DOI: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049.

6. Fedoseeva, E. V., Terekhova, V. A., Yakimenko, O. S. and Gladkova, M. M. (2009). Ecotoxicological evaluation of commercial humates of different origin using microalgae *Scenedesmus quadricauda*. *Theoretical and Applied Ecology*, No. 4, pp. 45–49. DOI: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049.

7. Cherdakova, A. S. (2017). Ecological assessment of the effect of various humic preparations on the state of technogenically modified gray forest soils. DSc Thesis in Biology. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia.

8. Atlas, R. M. and Hazen, T. C. (2011). Oil biodegradation and bioremediation: a tale of the two worst spills in U.S. history. *Environmental Science & Technology*, No. 45 (16), pp. 6709–6715. DOI: 10.1021/es2013227.

9. Beškoski, V. P., Milic, J. S., Gojgic-Cvijovic, G. D., Ilic, M. V., Miletic, S. B., Jovančević, B. S. and Vrvic, M. M. (2012). Bioremediation of soil polluted with crude oil and its derivatives: Microorganisms, degradation, pathways, technologies. *Hemijaska Industrija*, No. 66 (2), pp. 275–289. DOI: 10.2298/HEMIND110824084B.

10. Brown, L. D., Gee, K. F., Cologgi, D. L. and Ulrich, A. C. (2017). Bioremediation of oil spills on land. In: Fingas, M. (ed.) *Oil Spill Science and Technology*, 2nd edition. Houston: Gulf Professional Publishing, pp. 699–729.

11. Grechishcheva, N. Yu., Meshcheryakov, S. V., Perminova, I. V. and Kholodov, V. A. (2017). Stabilization of oil-in-water emulsions by highly dispersed particles: Role in self-cleaning processes and prospects for practical application. *Russian Journal of General Chemistry*, Vol. 87, pp. 2166–2180. DOI: 10.1134/S1070363217090432.

12. Ivanov, A. A., Yudina, N. V., Mal'tseva, E. V., Matis, E. Ya. and Svarovskaya, L. I. (2010). Stimulation of the activity of microorganisms by humin preparations in oil-polluted soils. *Eurasian Soil Science*, Vol. 43, pp. 210–215. DOI: 10.1134/S1064229310020110.

13. Liang, Y, Britt, D. W., McLean, J. E., Sorensen, D. L. and Sims, R. C (2007). Humic acid effect on pyrene degradation: finding of an optimal range for pyrene solubility and mineralization enhancement. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 74, Issue 6, pp. 1368–1375. DOI: 10.1007/s00253-006-0769-8.

14. Lipczynska-Kochany, E. (2018). Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil. *Chemosphere*, Vol. 202, pp. 420–437. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.1.

15. Liu, Q., Tang, J., Gao, K., Gurav, R. and Giesy, J. P. (2017). Aerobic degradation of crude oil by microorganisms in soils from four geographic regions of China. *Scientific Reports*, No. 7, 14856. DOI: 10.1038/s41598-017-14032-5.

16. Ortega-Calvo, J. J. and Saiz-Jimenez, C. (1998). Effect of humic fractions and clay on biodegradation of phenanthrene by a *Pseudomonas fluorescens* Strain isolated from soil. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 64, No. 8, pp. 3123–3126. DOI: 10.1128/AEM.64.8.3123-3126.1998.

17. Rodrigues, E. M., Kalks, K. H. and Tótoła, M. R. (2015). Prospect, isolation, and characterization of microorganisms for potential use in cases of oil bioremediation along the coast of Trindade Island, Brazil. *Journal of Environmental Management*, Vol. 156, pp. 15–22. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.03.016.

18. Saini, H. and Arya, I. D. (2016). Bioremediation of oil polluted soil: Effect on hill bamboo (*Drepanostachyum falcatum*) plant emergence and height. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, Vol. 8(6), pp. 46–52. DOI: 10.5897/JABSD2016.0269.

19. Sakthipriya, N., Doble, M. and Sangwai, J. S. (2015). Bioremediation of coastal and marine pollution due to crude oil using a microorganism *Bacillus subtilis*. *Procedia Engineering*, Vol. 116, pp. 213–220. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.284.

20. Shimp, R. and Pfaender, F. K. (1985). Influence of naturally occurring humic acids on biodegradation of monosubstituted phenols by aquatic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 49, Issue 2, pp. 402–407.

21. Yakimenko, O. S. and Terekhova, V. A. (2011). Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes. *Eurasian Soil Science*, Vol. 44, No. 11, pp. 1222–1230. DOI: 10.1134/S1064229311090183.

22. Yang, Y., Shu, L., Wang, X., Xing, B. and Tao, S. (2012). Mechanisms regulating bioavailability of phenanthrene sorbed on a peat soil-origin humic substance. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1431–1437. DOI: 10.1002/etc.1844.

Авторы

Чердакова Алина Сергеевна, канд. биол. наук
Рязанский государственный университет имени
С. А. Есенина, г. Рязань, Россия
E-mail: cerdakova@yandex.ru

Гальченко Светлана Васильевна, канд. биол. наук,
доцент
Рязанский государственный университет имени
С. А. Есенина, г. Рязань, Россия
E-mail: s.galchenko2019@gmail.com

Воробьева Елена Владимировна, канд. техн. наук
Рязанский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет», г. Рязань, Россия
E-mail: vorobeva-70@bk.ru

Authors

Cherdakova Alina Sergeevna, PhD in Biology
Ryazan State University named for S. Yesenin, Ryazan, Russia
E-mail: cerdakova@yandex.ru

Galchenko Svetlana Vasilyevna, PhD in Biology, Associate
Professor
Ryazan State University named for S. Yesenin, Ryazan, Russia
E-mail: s.galchenko2019@gmail.com

Vorob'eva Elena Vladimirovna, PhD in Engineering
Ryazan Institute (branch) of the Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education «Moscow
Polytechnic University», Ryazan, Russia
E-mail: vorobeva-70@bk.ru