

Обзорная статья

УДК 502.37; 504.054; 504.06; 504.53

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537>



## Использование поверхностно-активных веществ в биodeградации гидрофобных соединений: обзор

Иван Анатольевич Топчий\*, Дэвард Иосифович Стом\*\*\*, Кристина Юрьевна Донина\*\*, Сергей Валерьевич Алферов\*\*\*, Ирина Александровна Нечаева\*\*\*, Александр Борисович Купчинский\*\*, Борис Никитович Огарков\*, Юлия Юрьевна Петрова\*\*\*\*, Елена Владимировна Антонова\*

\*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

\*\*Байкальский музей СО РАН, п. Листвянка, Российская Федерация

\*\*\*Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация

\*\*\*\*Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Стом Дэвард Иосифович, [stomd@mail.ru](mailto:stomd@mail.ru)

**Аннотация.** Развитие промышленности привело к колоссальным выбросам и накоплению в окружающей среде гидрофобных органических соединений (ГОС). В первую очередь стоит назвать углеводороды нефти, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и полихлорбифенилы. Интенсивное и широкое применение гидрофобных пестицидов в сельском хозяйстве способствовало загрязнению ими почвы, воздуха и воды. Многие из гидрофобных веществ являются опасными для представителей биоты, поскольку обладают высоким токсическим, канцерогенным и мутагенным действием на организмы. Кроме широкой распространенности, их возможные негативные эффекты определяются и устойчивостью к разложению, в том числе биологическому. Это позволяет им в течение длительного времени сохраняться в почве, воде и других средах. Воздействие ГОС на экосистемы представляет потенциальную угрозу не только для окружающей среды, но и для здоровья человека. Существует труднообозримое число исследований, посвященных ремедиации почв, загрязненных ГОС. Можно до некоторой степени условно выделить механические, химические и биоремедиационные методы. Первые два особенно широко применялись в прошлом. Биоремедиационные методы оказались более эффективными и дешевыми. Биоремедиация – это, как правило, более рентабельная и экологически безопасная технология. В последние годы показана хорошая эффективность солибилизирующих агентов в биоремедиационных процессах. Широкую популярность приобрели различные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Их способность увеличивать десорбцию, растворимость в воде и микробную биодоступность ГОС хорошо известна. В настоящем кратком обзоре рассмотрены современные литературные сведения по биodeградации гидрофобных органических соединений, стимулируемой поверхностно-активными веществами.

**Ключевые слова:** биоремедиация, биodeградация, гидрофобные загрязнители, поверхностно-активные вещества, микроорганизмы

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности (проект № FEWG-2021-0013).

**Для цитирования:** Топчий И. А., Стом Д. И., Донина К. Ю., Алферов С. В., Нечаева И. А., Купчинский А. Б., Огарков Б. Н., Петрова Ю. Ю., Антонова Е. В. Использование поверхностно-активных веществ в биodeградации гидрофобных соединений: обзор // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 4. С. 521–537. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537>.

## Use of surfactants in biodegradation of hydrophobic compounds: A review

Ivan A. Topchiy\*, Devard I. Stom<sup>\*,\*\*</sup>, Kristina Yu. Donina<sup>\*\*</sup>, Sergey V. Alferov<sup>\*\*\*</sup>,  
Irina A. Nechaeva<sup>\*\*\*</sup>, Alexander B. Kupchinsky<sup>\*\*</sup>, Boris N. Ogarkov\*,  
Yulia Yu. Petrova<sup>\*\*\*\*</sup>, Elena V. Antonova\*

\*Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

\*\*Baikal Museum of the SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

\*\*\*Tula State University, Tula, Russian Federation

\*\*\*\*Surgut State University, Surgut, Russian Federation

Corresponding author: Devard I. Stom, stomd@mail.ru

**Abstract.** Industrial development has led to immense emission and accumulation of hydrophobic organic compounds (HOC) in the environment. Primarily, they include petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs). The extensive use of hydrophobic pesticides in agriculture led to the contamination of soil, air and water. Many of the hydrophobic substances are dangerous for the biota due to their high toxicity and carcinogenic and mutagenic activity. In addition to their widespread use, the possible adverse effects are also determined by their resistance to decomposition, including the biological one, which defines their long-term persistence in soil, water and other media. The impact of HOC on ecosystems poses a potential threat not only to the environment but also to human health. Numerous studies were devoted to the remediation of soils polluted with HOC. The approaches to remediation can be conditionally divided into mechanical, chemical and bio-methods, with the former two being widely used in the past. Bioremediation methods proved more efficient and, as a rule, more cost-effective and environmentally friendly. In recent years, the good efficiency of solubilizing agents in bioremediation processes has been demonstrated. Various surfactants have become widely popular due to their ability to increase desorption, water solubility and microbial bioavailability of HOC. In this brief review, state-of-the-art literature data on the biodegradation of hydrophobic organic compounds using surfactants were considered.

**Keywords:** bioremediation, biodegradation, hydrophobic pollutants, surfactants, microorganisms

**Funding.** The reported study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a state assignment in the field of scientific activity (project no. FEWG-2021-0013).

**For citation:** Topchiy I. A., Stom D. I., Donina K. Yu., Alferov S. V., Nechaeva I. A., Kupchinsky A. B., Ogarkov B. N., Petrova Yu. Yu., Antonova E. V. Use of surfactants in biodegradation of hydrophobic compounds: A review. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(4):521-537. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537>.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности привело к колоссальным выбросам и накоплению в окружающей среде гидрофобных органических соединений (ГОС). Интенсивное и широкое применение гидрофобных пестицидов в сельском хозяйстве способствовало загрязнению ими почвы, воздуха и воды, поэтому их можно включить в группу ГОС [1].

Многие из гидрофобных веществ являются опасными для представителей биоты. В первую очередь стоит назвать углеводороды нефти, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и полихлорбифенилы (ПХБ) [2–4].

Некоторые из приведенных выше классов поллютантов обладают высоким токсическим, канцерогенным и мутагенным действием на организмы. Кроме широкой распространенности, их возможные негативные эффекты определяются и устойчивостью к разложению, в том чис-

ле биологическому. Это позволяет им в течение длительного времени сохраняться в почве, воде и других средах. Воздействие ГОС на экосистемы представляет потенциальную угрозу не только для окружающей среды, но и для здоровья человека [5]. Существует труднообозримое число исследований, посвященных ремедиации почв, загрязненных ГОС, с использованием различных методов и подходов. Некоторые аспекты этой проблемы озвучены в работах [6–8]. Можно до некоторой степени условно выделить механические, химические и биоремедиационные методы. Первые два особенно широко применялись в прошлом. Однако вследствие высокой стоимости, низкой эффективности и повышенной вероятности вторичного загрязнения воздуха и подземных вод использование химических и/или физических методов заметно сокращается. Биоремедиационные методы оказались более

эффективными, дешевыми и прочно укрепились как экологически наиболее безвредный способ восстановления плодородия почв. Биоремедиация – это, как правило, рентабельная и экологически безопасная технология [9–14]. Очевидно, что эффективность биоремедиации во многом зависит от выбора активных организмов, соответствующих условий почвы и устойчивости поллютантов к биоразложению [15, 16].

В последние годы показана хорошая эффективность солицизирующих агентов в биоремедиационных процессах. Широкую популярность приобрели различные поверхностно-активные вещества (ПАВ). Способность ПАВ увеличивать десорбцию, растворимость в воде и микробную биодоступность ГОС хорошо известна [17–24].

В настоящем кратком обзоре рассмотрены современные литературные сведения по биодegradации гидрофобных органических соединений, стимулируемой поверхностно-активными веществами.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ПРИМЕНЯТЬ ИХ В БИОРЕМЕДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

ПАВ представляют собой амфифильные соединения, в молекулярной структуре которых имеются как гидрофобные, так и гидрофильные группы. В зависимости от химической природы гидрофильной части ПАВ классифицируют на неионогенные и ионные. В свою очередь, ионные ПАВ могут быть катионными, анионными или амфотерными (несущими как положительный, так и отрицательный заряд и ведущими себя как цвиттер-ион в изоэлектрической точке) [25]. Кроме того, выделяют и полимерные ПАВ [26].

Многие представители ПАВ способны в водном растворе агрегировать с образованием мицелл. Отличительной особенностью ПАВ, собранных в эти кластеры, является то, что неполярная центральная часть мицеллы может захватывать ГОС. Это повышает растворимость ГОС в водных средах и тем самым увеличивает их биодоступность. Данное свойство является ключевым во многих ремедиационных процессах, связанных с удалением ГОС [27, 28].

Амфифильные свойства молекул ПАВ позво-

ляют им взаимодействовать с различными гидрофобными соединениями. В этом заключается их поверхностная активность. Так, к примеру, ПАВ эффективно снижают межфазное натяжение вода/сырая нефть до сверхнизких значений ( $<10-2$  мН/м) и способствуют образованию эмульсий и микроэмульсий, приводя к мобилизации захваченной нефти [29].

Эмульгирующая активность – важный фактор, влияющий на образование стойких эмульсий ПАВ. Это свойство нашло применение в эффективном выкачивании нефти в ходе ее добычи. Показано, что эмульсии типа масло/вода могут способствовать увеличению объема нефтяного пласта путем закупоривания каналов с высокой проницаемостью [30, 31]. С другой стороны, эмульсии типа вода/масло с высокой вязкостью могут усиливать эффективность захвата и коэффициент подвижности закачиваемой жидкости [32, 33]. Кроме того, микроэмульсии демонстрируют исключительную эффективность экстракции, повышая извлечение нефти [34–36].

Фазовое поведение микроэмульсии зависит от концентрации ПАВ, соотношения нефть:вода, солености и температуры. Микроэмульсии, образованные различными видами ПАВ, отличаются чувствительностью к факторам, воздействующим на нее. По сравнению с ионным ПАВ, температура оказывает более значительное влияние на фазовое поведение микроэмульсии неионогенных ПАВ. Межфазное напряжение и солибилизирующая способность также меняются в зависимости от типа фазы [37].

Значительное число исследований посвящено влиянию фракций (таблица) сырой нефти (в частности тяжелых фракций) на различные межфазные процессы (снижение межфазного натяжения, эмульгирующие свойства, адсорбция) на границе раздела вода–масло [37–42].

П. Шарма и соавторы показали, что состав, содержащий натриевую соль пропоксисульфатного спирта, диоктилсульфосукцинат натрия, монобутиловый эфир триэтиленгликоля и хлорид натрия, эффективен для растворения тяжелой фракции нефти в однофазной микроэмульсии. С его помощью все компоненты смол были солибилизованы. Анализ солености некоторых составов ПАВ выявил необычную зависимость параметра солилизации нефти от высокой солености раствора.

Классификация нефти по фракциям  
 Oil classification by fractions

| Фракция                    | Тип фракций |                 | Условия получения     | Температура кипения |
|----------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| Петролейная                | Легкие      | Светлые         | Атмосферная перегонка | До 100 °С           |
| Бензиновая                 |             |                 |                       | 100–140 °С          |
| Лигроиновая                | Средние     |                 |                       | 140–180 °С          |
| Керосиновая                |             |                 |                       | 180–220 °С          |
| Дизельная                  |             |                 |                       | 220–350 °С          |
| Вакуумный газойль          | Тяжелые     | Темные (мазуты) | Вакуумная перегонка   | 350–500 °С          |
| Гудрон (вакуумный остаток) |             |                 |                       | Более 500 °С        |

Результаты тестирования показали, что возможно получение однофазной микроэмульсии при динамических условиях. При этом извлечение нефти из нефтеносных песков было возможно при низком давлении. После чего солюбилизация была очень высокой и достигала 320 кг/м<sup>3</sup> [43].

В. Р. Масрат и соавторы исследовали солюбилизацию нафталина и пирена различными мицеллярными композициями на основе неионогенных (Brij-30 и Brij-56), катионных (додецилэтилдиметиламмоний бромид, цетилтриметиламмоний бромид) и анионных (додецилсульфат натрия) ПАВ. Они выяснили, что порядок солюбилизации ПАВ убывает в ряду неионогенный ПАВ > катионный ПАВ > анионный ПАВ с логарифмической шкалой значения коэффициента разделения мицелла/вода (Km) 4,79; 4,66 и 4,32 для нафталина и 6,91; 6,64 и 6,44 для пирена соответственно [44]. Аналогичный порядок ранее наблюдали для анионных и неионных ПАВ при солюбилизации нафталина и фенантрена [45].

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ПАВ ДЛЯ БИОРЕМЕДИАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Многие ПАВ, начиная с определенной концентрации, обладают токсическим действием различной степени по отношению к организмам. Во многом оно определено физико-химическими свойствами. К примеру, токсичность неионогенных ПАВ зависит от длины углеводородной и этоксилированной цепей. Чем длиннее алкильная цепь и короче этоксилированная, тем токсичнее соединение. Линейные молекулы зачастую более токсичны, чем разветвленные, хотя этот эффект компенсируется большей биоразлагаемостью первых [46]. Адгезия ПАВ на поверхности клеток может приводить к изменению заряда, дзета-потенциала, гидрофобности клеточной стенки и плазмалеммы. Все это ведет к нарушению их барьерных функций, проницаемости, а также других клеточных процессов и сказывается на росте и жизнеспособности микроорганизмов. В исследовании Л. Ванга и соавторов  $\alpha$ -гемолитические стрептококки под воздействием цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) в концентрации 0,1% испытывали все вышеперечисленные негативные эффекты [47, 48].

Накопление ПАВ в тканях и органах приводит к нарушениям в развитии эмбрионов у животных и замедлению прорастания семян растений [49, 50]. Они способны деформировать клетки и приводить к сбоям в осморегуляции [51]. Потенциальная токсичность ПАВ ограничивает их применение в биоремедиационных технологиях. Поэтому ключевым аспектом в решении этой проблемы является подбор низкотоксичных либо нетоксичных и, что не менее важно, биоразлагаемых соединений или использование биосурфактантов – биологических ПАВ, продуцируемых, прежде всего, микроорганизмами, а также организмов-биодеструкторов, способных адаптироваться к присутствию ПАВ.

#### ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА В БИОРЕМЕДИАЦИИ

Серьезным фактором, ограничивающим применение ПАВ в биоремедиации гидрофобных загрязнителей, является их сильная сорбция на твердых фазах [52, 53]. ПАВ способны увеличивать растворимость ГОС в воде и вызывать их десорбцию. Поскольку поглощение органических соединений микроорганизмами происходит в основном через водную фазу, то распределение ГОС в мицеллярной псевдофазе ПАВ может сильно влиять на кинетику биоремедиации [4]. Большинство коллоидных частиц почвы заряжены отрицательно. Поэтому они могут связываться с катионными и анионными ПАВ посредством ионного обмена и ионной синхронизацией [54]. Последующее уменьшение межфазного напряжения между почвой и водой облегчает миграцию ГОС.

Интерес к биоремедиации ГОС не утихает, что следует из роста публикаций на эту тему. Несколько статей [54–56] и глав в книгах [57] обобщили данные об эффективности биоремедиации с добавлением ПАВ. За последние годы накоплено немало материалов, подтверждающих эффективность применения ПАВ в биоремедиации.

Л. Матураса и соавторы обнаружили, что добавление анионного ПАВ дигексилсульфосукцината натрия способствовало взаимодействию трибутилолова с почвенными бактериями и ускорению бактериальной деградации. Такой же эффект наблюдали для его продуктов распада (дибутилолово и монобутилолово). Критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) дигексилсульфосукцината натрия (10 мМ) не увеличивала количество десорбированного трибутилолова в начале эксперимента. Вместе с тем она усиливала бактериальную деградацию 100 мг Sn/кг данного ГОС. Параллельно наблюдали увеличение количества моно- и дибутилолова в жидкой фазе через 2 недели. В то же время десорбированное трибутилолово было вновь поглощено почвой в опыте без внесения ПАВ. Комплекс мономеров трибутилолова и ПАВ усиливал взаимодействие данного оловосодержащего ГОС с местными почвенными бактериями. Концентрация мицеллообразования у дигексилсульфосукцината натрия выше ККМ (70 мМ) не приводила к биоразложению десорбированного трибутилолова, поскольку высокие концентрации трибутилолова и ПАВ создавали синергетическое токсическое действие на бактерии [58].

А. Родригез и соавторы изучали влияние синтетических ПАВ в низких концентрациях на кинетику биоразложения ПАУ (флуорантен и антрацен) с помощью *Pseudomonas putida*, штамм ATCC 17514 и адгезию этих бактерий к ПАУ. Предполагается, что адгезия микроорганизмов играет важную роль в поглощении и трансформации ГОС. В работе использовали три ПАВ (додецилсульфат натрия, цетилтриметиламмония бромид, твин-20). Показано, что эффект каждого ПАВ на способность штамма ATCC 17514 разлагать флуорантен и антрацен и использовать их

как субстрат для роста значительно различался. Твин-20 в концентрации 0,08 мМ увеличивал скорость биоразложения флуорантена и удваивал максимальную удельную степень деградации антрацена. Присутствие додецилсульфата натрия в концентрации 0,35 мМ привело к снижению биодegradации флуорантена на 50%. Вместе с тем это в два раза повысило скорость удаления более гидрофобного антрацена (0,3 мг/л в ч). Наконец, цетилтриметиламмоний бромид в концентрации 0,27 мМ оказывал отрицательное влияние на биоразложение ПАУ, приводя к резкому снижению роста микроорганизмов [59].

Катионные ПАВ довольно прочно сорбируются на почвенных частицах [53]. С другой стороны, анионные ПАВ могут осаждаться 2-валентными катионами в почве [60]. Поэтому, как показывают результаты многих исследований, неионогенные ПАВ оказались более подходящими для восстановления загрязненных почв, чем катионные или анионные ПАВ [61]. Среди этих неионогенных ПАВ особый интерес вызывает полиоксиэтилен(20)сорбитанмоноолеат (Твин-80,  $C_{64}H_{124}O_{26}$ ). Он отличается довольно низкой стоимостью и малой токсичностью для почвенных микроорганизмов по сравнению с большинством других неионогенных ПАВ [62]. Эти особенности Твина-80 стимулировали многочисленные эксперименты по его применению в биоремедиации почв, загрязненных ГОС.

Помимо полиоксиэтилен(20)сорбитанмоноолеата (твин-80) в биоремедиации сред, загрязненных ГОС, используются другие неионогенные ПАВ. И. Со и П. Л. Бишоп изучили биодegradацию фенантрена в почве биопленкой, образованной бактериями рода *Pseudomonas* с использованием системы непрерывно проточных ячеек. Были сконструированы 32 проточных реактора для мониторинга разложения фенантрена и образования биопленок при 5 различных концентрациях неионогенного ПАВ (Тритон X-100): 0, 100, 200, 500 и 1000 мг/л. Среди испытанных брали концентрации ниже (0 и 100 мг/л) и выше (200, 500 и 1000 мг/л) ККМ. Показано, что образование бактериальной биопленки с внеклеточными полимерными веществами было стратегией бактерий по утилизации частично растворимых ПАУ. Однако в присутствии ПАВ эта стратегия была изменена. Все испытанные концентрации Тритон X-100 влияли на физиологические аспекты образования биопленки, а биодоступность фенантрена увеличивалась при добавлении ПАВ в концентрациях выше ККМ [63].

Д. К. Вольф и Дж. Ганоценили в своем исследовании оценили минерализацию 14С-пирена в почвах с добавлением и без добавления *Mycobacterium vanbaalenii* PYR-1. Было охарактеризовано действие синтетического неионогенного

ПАВ Brij-35. Оказалось, что Brij-35 обычно увеличивал разложение 14С-пирена, особенно в концентрации 216 мкг/г сухой почвы. Это может быть связано с повышенной биодоступностью пирена. Brij-35 не оказывал токсического воздействия на *M. vanbaalenii* PYR-1 при 10-кратной ККМ. Также в исследовании изучен вклад рамнолипида. Вероятно, он служил более выгодным источником углерода вместо 14С-пирена для бактерий. Это приводило к ингибированию деградации 14С-пирена. Его минерализация до 14С- $CO_2$  под действием *M. vanbaalenii* PYR-1 достигала 60% через 10 дней. Процесс наблюдали как в свободных от ПАВ почвах, так и в почвах с Brij-35. По мнению авторов, выбор ПАВ для усиления биоремедиации имеет решающее значение [64].

### БИОДЕГРАДАЦИЯ ГИДРОФОБНЫХ ПЕСТИЦИДОВ

Неблагоприятное воздействие агрохимикатов на окружающую среду общеизвестно. Применение пестицидов в сельском хозяйстве приводит к загрязнению почвы, воздуха и воды. В природных экосистемах на пестициды, их подвижность и трансформацию влияют физические, химические и/или биологические факторы. Они включают биоразложение, улетучивание, аккумуляцию в почве, поглощение растениями и микроорганизмами, а также перенос в почву и поверхностные воды [65]. Кроме того, на их распределение в почве, воде и воздухе влияют межфазный перенос и процессы адсорбции/десорбции [66]. Пестициды, поглощаемые живыми организмами, подвержены биоаккумуляции [67] и частичному преобразованию в другие соединения [68, 69].

Гидрофобные пестициды считаются неподвижными в почве из-за их очень низкой растворимости в воде. Однако во всем мире в подземных водах и удаленных экосистемах обнаружено значительное количество гидрофобных пестицидов. Эти данные о повышенной непреднамеренной подвижности в почве могут быть объяснены преимущественным течением воды или переносом с почвенными коллоидами [70]. За счет ПАВ возможно увеличить переход гидрофобных пестицидов в раствор и повысить доступность для микроорганизмов-биодеструкторов.

Некоторые работы подробно иллюстрируют процессы биодegradации различных пестицидов микроорганизмами в присутствии ПАВ. А. К. Сингх и С. С. Камеотра показали, что степень и скорость микробной деградации гербицида атразина зависят от типа ПАВ, концентрации, используемого штамма, целевого соединения и условий окружающей среды. В исследовании был применен штамм *Acinetobacter* sp. А6, трансформирующий атразин в процессе деалкилирования. В присутствии ПАВ (рамнолипиды *Pseudomonas*

*aeruginosa* A11 и Тритон X-100) на степень и скорость деградации атразина в значительной степени влияли смежные условия. В минерально-солевой среде добавление ПАВ снижало скорость деградации атразина за счет уменьшения взаимодействия между более гидрофобными бактериями и мицеллами, заключенными в атразин. Однако в почвенной системе добавление ПАВ усиливало деградацию за счет усиления десорбции атразина из почвы и делало его более доступным для *Acinetobacter* sp. А6. Продемонстрировано, что рамнолипиды сильнее увеличивают микробную деградацию атразина, чем Тритон X-100 [71].

Дж. Чжао и соавторы изучили влияние 2-х био-разлагаемых неионогенных ПАВ (Твин-80 и Brij-35) и  $\beta$ -циклодекстрина ( $\beta$ -ЦД) на гидрофобность клеточной поверхности *Bacillus licheniformis* B-1 и степень биodeградации  $\beta$ -циперметрина. Кроме того, авторами исследовано влияние выбранных ПАВ на растворимость, сорбцию и разложение  $\beta$ -циперметрина. Биodeградация этого пестицида достаточно низкая, особенно при высоких концентрациях. Как правило, это происходит из-за плохого контакта между  $\beta$ -ЦД и клетками микроорганизмов-биодеструкторов. Результаты показали, что Твин-80 немного стимулирует рост штамма, в то время как Brij-35 и  $\beta$ -ЦД мало влияют на его рост. Гидрофобность клеточной поверхности *B. licheniformis* B-1 и растворимость  $\beta$ -циперметрина заметно менялись при использовании Твина-80 и Brij-35. ПАВ и  $\beta$ -ЦД усиливали сорбцию и деградацию  $\beta$ -циперметрина штаммом B-1. Наиболее сильно пестицид разлагался в присутствии Brij-35. Когда концентрация ПАВ или  $\beta$ -ЦД была 2,4 г/л, скорость деградации пестицида при обработке Brij-35, Твином-80 и  $\beta$ -ЦД составляла 89,4; 50,5 и 48,1% соответственно. Период полувыведения  $\beta$ -циперметрина при использовании Brij-35 сократился на 69,1 ч. Содержание этого пестицида в почве как в присутствии штамма B-1, так и с *B. licheniformis* B-1 и Brij-35 снизилось с 22,29 до 4,41 мг/кг после инкубации в течение 22 дней.

Из вышесказанного следует, что ПАВ различной природы могут быть применены для повышения биодоступности гидрофобных пестицидов.

### БИОДЕГРАДАЦИЯ ГИДРОФОБНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ПРИСУТСТВИИ БИОПАВ

Поверхностно-активные вещества природного происхождения, продуцируемые организмами, получили название биоПАВ. Изучение биоПАВ началось еще в 60-х годах XX века и интенсивно продолжается по сей день [72–74]. Такое внимание обусловлено тем, что биоПАВ находят применение в различных отраслях промышленности благодаря преимуществам перед синтетическими

ПАВ. Они обладают низкой токсичностью; био-разлагаемостью; способностью функционировать в широких диапазонах pH, температуры и солености среды; высокой поверхностной активностью и могут быть получены биотехнологически из промышленных отходов и побочных продуктов нефтепереработки [75].

БиоПАВ разделяют на два основных класса [76]: низкомолекулярные соединения, называемые биосурфактантами (липопептиды, гликолипиды, пептиды), и высокомолекулярные полимеры (полисахариды, протеины, липополисахариды, липопротеины или комплекс этих биополимеров), которые называются биоэмульсанами [77], или биоэмульгаторами. В первую группу входят молекулы, которые могут эффективно снижать поверхностное и межфазное натяжение, а ко второй относятся амфифильные и полифильные полимеры, обладающие высокой и стабильной эмульгирующей активностью в системе масло–вода, но невысокой поверхностной активностью [78].

По своему строению биоПАВ классифицируются на гликолипиды (рамнолипиды, трегалолипиды, софоролипиды); липопептиды и липопротеины; жирные кислоты; фосфолипиды; полимерные сурфактанты; связанные биосурфактанты [75]. Также можно выделить сапонины – биоПАВ растительного происхождения.

**Биосурфактанты микроорганизмов.** Микроорганизмы являются основными продуцентами биосурфактантов. Большой интерес для изучения и применения представляет один из наиболее распространенных типов биоПАВ микробной природы – гликолипидные биосурфактанты. К ним относят рамнолипиды, софоролипиды, трегалолипиды. Продуцентами трегалолипидов являются бактерии родов *Mycobacterium*, *Rhodococcus*, *Nocardia*, *Gordonia*, *Arthrobacter* [73].

В работе Т. М. Льюнг и соавторов [79] показано, что бактерии-деструкторы углеводов нефти рода *Rhodococcus* являются эффективными продуцентами биосурфактантов гликолипидной природы: поверхностное натяжение среды уменьшалось с 72 до 27 мН/м. Содержание трегалолипидов составило 305 и 280 мг/л для *Rhodococcus erythropolis* X5 и *Rhodococcus erythropolis* S67 соответственно. Установлено, что основными гликолипидными биосурфактантами, продуцируемыми бактериями *Rh. erythropolis* X5 и *Rh. erythropolis* S67, выращенными на *n*-гексадекане, как при 26 °С, так и при 10 °С являются 2,3,4-сукцинил-окта-ноил-деканойл-2'-деканойлтрегалоза и 2,3,4-сукцинил-диоокта-ноил-2'-деканойлтрегалоза [80, 81]. Кроме того, авторами работы показано, что качественный состав биосурфактантов, продуцируемых бактериями *Rhodococcus* при росте на *n*-гексадекане в условиях пониженной температуры 10 °С, в целом соответствует составу биосурфактан-

тов, продуцируемых этими бактериями при температуре 26 °С. Это означает, что важную роль в процессе потребления гидрофобных субстратов бактериями-нефтедеструкторами играют гликолипидные биосурфактанты, которые способствуют доступности для микроорганизмов *n*-гексадекана, находящегося как в жидком при 26 °С, так и в твердом состоянии при 10 °С. Кроме того, выявлена корреляция между содержанием трегаполипидных биоПАВ и степенью биodeградации *n*-гексадекана [82].

Для характеристики поверхностно-активных свойств сукцинилтрегаполипидов была определена зависимость поверхностного натяжения на границе раздела воздух–вода от содержания вещества в растворе. Зависимость имеет типичный для ПАВ вид: резкое снижение значений поверхностного натяжения наблюдали уже при небольших концентрациях вещества. Значение ККМ составило  $4,1 \times 10^{-5}$  М (32 мг/л) при постоянном поверхностном натяжении 27 мН/м, что свидетельствует о высокой поверхностной активности сукцинилтрегаполипида как сурфактанта. Индекс эмульгирования ( $E_{24}$ ) выделенных сукцинилтрегаполипидов в системе с гексадеканом составил 55%. Тип образуемой эмульсии любого ПАВ с гидрофобным субстратом зависит от гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ) вещества. ГЛБ является критерием практического применения ПАВ, в зависимости от величины которого и подбирают сурфактанты и эмульгаторы. Рассчитанное значение ГЛБ сукцинилтрегаполипидов находится в интервале 10–11. Согласно шкале Гриффина, вещества со значениями ГЛБ 8–18 способны образовывать эмульсии типа масло в воде. Молярная солюбилизация гексадекана составила 4 моль на 1 моль сукцинилтрегаполипида в водном растворе [81].

А. Б. Молдес и соавторы сравнили биоремедиацию загрязненной почвы углеводородами нефти (УН) в различных условиях и предположили положительную роль биосурфактантов в биоразложении загрязняющих веществ. Биосурфактант, производимый *Lactobacillus pentosus*, значительно ускорил биodeградацию нефтяных углеводородов после 40 дней инкубации [83]. К. Патель и М. Пательна оценили возможность *Stenotrophomonas* sp. S1VKR-26 продуцировать биосурфактант и определили его способность к биоремедиации сточных вод нефтеперерабатывающих заводов *ex situ* в биореакторе. Также была оценена фитотоксичность сточных вод после биоремедиации. Было обнаружено, что штамм продуцирует 5,15 г/л биосурфактанта, 30 мг/л ККМ и снижает поверхностное натяжение с 60,3 до 30,5 мН/м. Содержание нафталина было снижено на 93%, фенантрена – на 86%, флуорантена – на 92%, пирена – на 98,3%, УН – на 72,33%, фенольных соединений – на 93,06%. Более того, сточные воды нефтепродуктов, обработанные штаммом S1VKR-26 в соотношении 1:1, демонстрируют высокую всхожесть (100%), силу роста (486) и длину ростков (4,86 см) по сравнению с необра-

ботанными сточными водами [84]. И. Б. Ившина, М. С. Куюкина и соавторы изучили возможность использования консорциума иммобилизованных в полимерном носителе актинобактерий рода *Rhodococcus* для обработки нефтепромысловой сточной воды в биореакторе. Установлено, что клетки *R. opacus* ИЭГМ 263 и *R. ruber* ИЭГМ 231 сохраняли жизнеспособность при высоком содержании минеральных солей в воде и были способны окислять нефтяные углеводороды на 62–81%. Показано, что консорциум родококков более эффективно удалял нефтепродукты из промышленной воды по сравнению с монокультурами [85].

Из вышесказанного следует, что биосурфактанты микробного происхождения обладают высокой поверхностной и эмульгирующей активностью и могут быть использованы в биоремедиации территорий, загрязненных гидрофобными поллютантами.

**Биосурфактанты растительного происхождения.** Некоторые растения способны продуцировать ПАВ, которые относят к классу сапонинов. Это гликозиды, содержащие одну или несколько сахарных цепей с трипереновыми или стероидными агликонами. Применение сапонинов не ограничено областями медицины, пищевой промышленности и косметологии. В последние десятилетия солюбилизирующие и поверхностно-активные свойства этих соединений все чаще позволяют рассматривать их в качестве альтернативы синтетическим ПАВ в биоремедиации гидрофобных поллютантов [6, 86–89]. Так, в одном из последних исследований Юэ Сун и соавторы изучали взаимосвязь между температурой и солюбилизацией нафталина сапонином путем измерения ККМ, размера частиц и термодинамики. Результаты показали, что солюбилизирующий эффект сапонины увеличивается при повышении температуры с 298 до 313 К. Это также приводило к снижению ККМ, увеличению диаметра частиц и усилению молекулярной активности. Все вышеперечисленное создавало усиленный солюбилизирующий эффект сапонины. Показана потенциальная применимость сапонины для улучшенной ремедиации нафталина [90].

М. Давин и соавторы исследовали потенциал сапонины как экстрагирующих агентов и усилителей биоремедиации почв, загрязненных ПАУ. Поллютанты из образцов почвы экстрагировали растворами сапонины (0, 1, 2, 4 и 8 г/л) и инкубировали в течение 14 дней. Показано, что раствор сапонины объемом 4 г/л экстрагировал значительное количество аценафтена, флуорена, фенантрена, антрацена и пирена [91].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре собраны и рассмотрены современные литературные сведения по биodeградации ГОС, стимулируемой ПАВ. За последние годы накоплено немало результатов исследований, подтверждающих эффективность применения различных по химической природе ПАВ в биоремедиации. Отмечено, что одни соединения в

определенных концентрациях влияют на биоремедиацию положительно, в то время как другие либо не оказывают желаемого эффекта, либо даже способствуют угнетению биодеструкции. Однако тонкости биоремедиационных процессов в присутствии ПАВ остаются слабо изученными как на биофизическом, так и на биохимическом

уровнях. Особое внимание в последнее время сосредоточено на изучении биоПАВ – микробных биосурфактантов и сапонинов. Эти соединения обладают высокой способностью к биоразложению и низкой токсичностью для живых организмов.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. García-Delgado C., Marín-Benito J. M., Sánchez-Martín M. J., Rodríguez-Cruz M. S. Organic carbon nature determines the capacity of organic amendments to adsorb pesticides in soil // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 390. P. 122–162. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122162>.
2. Jin M., Yu X., Yao Z., Tao P., Li G., Yu X., et al. How biofilms affect the uptake and fate of hydrophobic organic compounds (HOCs) in microplastic: insights from an in situ study of Xiangshan Bay, China // *Water Research*. 2020. Vol. 184. P. 116–118. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116118>.
3. Taylor A. C., Fones G. R., Vrana B., Mills G. A. Applications for passive sampling of hydrophobic organic contaminants in water – a review // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 51, no. 1. P. 20–54. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1675043>.
4. Trellu C., Mousset E., Pechaud Y., Huguenot D., van Hullebusch E. D., Esposito G., et al. Removal of hydrophobic organic pollutants from soil washing/flushing solutions: a critical review // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. Vol. 306. P. 149–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.008>.
5. Zeng Z., Liu Y., Zhong H., Xiao R., Zeng G., Liu Z., et al. Mechanisms for rhamnolipids-mediated biodegradation of hydrophobic organic compounds // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 634. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.349>.
6. Kupryianchyk D., Hale S., Zimmerman A. R., Harvey O., Rutherford D., Abiven S., et al. Sorption of hydrophobic organic compounds to a diverse suite of carbonaceous materials with emphasis on biochar // *Chemosphere*. 2016. Vol. 44. P. 879–887. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.055>.
7. Richard E., Saichek R. E., Reddy K. R. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2005. Vol. 35. P. 115–192. <https://doi.org/10.1080/1064338059000237>.
8. Trellu C., Pechaud Y., Oturan N., Mousset E., van Hullebusch E. D., Huguenot D., et al. Remediation of soils contaminated by hydrophobic organic compounds: how to recover extracting agents from soil washing solutions? // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 404. P. 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124137>.
9. Ashraf S., Ali Q., Ahmad Z. Z., Ashraf S., Asghar N. H. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. Vol. 174. P. 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>.
10. Lu H., Wang W., Li F., Zhu L. Mixed-surfactant-enhanced phytoremediation of PAHs in soil: bioavailability of PAHs and responses of microbial community structure // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 653. P. 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.385>.
11. Rodriguez-Campos J., Perales-Garcia A., Hernandez-Carballo J., Martinez-Rabelo F., Hernandez-Castellanos B., Barois I., et al. Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the combination of three technologies: bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation // *Journal of Soils and Sediments*. 2019. Vol. 19. P. 1981–1994. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2213-y>.
12. Shi Z., Liu J., Tang Z., Zhao Y., Wang C. Vermiremediation of organically contaminated soils: concepts, current status, and future perspectives // *Applied Soil Ecology*. 2020. Vol. 147. P. 103377. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103377>.
13. Shishir T. A., Mahbub N., Kamal N. E. Review on bioremediation: a tool to resurrect the polluted rivers // *Pollution*. 2019. Vol. 5. P. 555–568. <https://doi.org/10.22059/poll.2019.272339.558>.
14. Villela H. D. M., Pexito R. S., Soriano A. U., Carmo F. L. Microbial bioremediation of oil contaminated seawater: a survey of patent deposits and the characterization of the top genera applied // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 666. P. 743–758. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.153>.
15. Azubuike C. C., Chikere C. B., Okpokwasili G. C. Bioremediation techniques – classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 32. P. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>.
16. Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 706. P. 135739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
17. Kang S., Kim G., Choe J. K., Choi Y. Effect of using powdered biochar and surfactant on desorption and biodegradability of phenanthrene sorbed to biochar // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 371. P. 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.104>.
18. Ghosh I., Mukherji S. Diverse effect of surfactants on pyrene biodegradation by a *Pseudomonas* strain utilizing pyrene by cell surface hydrophobicity induction // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2016. Vol. 10. P. 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.12.010>.

19. Стом Д. И., Богданова И. А., Саксонов М. Н., Толстой В. М., Евтушенко Л. И., Се Б. Ж. Влияние гумата на адгезию клеток и спор микроорганизмов и их десорбцию с гидрофобизированных поверхностей // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2017. Т. 21. С. 31–40.
20. Стом Д. И., Боярова Н. А., Дагуров А. В., Вятчина О. Ф., Саксонов М. Н. Возможные механизмы биологического действия гуминовых веществ // Сибирский медицинский журнал. 2008. Т. 81. № 6. Р. 76–79.
21. Wei W., Ran Z., He H., Zhou K., Huangfu Z., Yu J. Desorption process and morphological analysis of real polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil by the heterogemini surfactant and its mixed systems // Chemosphere. 2020. Vol. 254. P. 126854. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126854>.
22. Yadav M., Shukla A. K., Srivastva N., Upadhyay S. N., Dubey S. K. Utilization of microbial community potential for removal of chlorpyrifos: a review // Critical Reviews in Biotechnology. 2016. Vol. 3. P. 727–742. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1015958>.
23. Yanto D. H. Y., Tachibana S. Enhanced biodegradation of asphalt in the presence of tween surfactants,  $Mn^{2+}$  and  $H_2O_2$  by *Pestalotiopsis* sp. in liquid medium and soil // Chemosphere. 2014. Vol. 10. P. 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.044>.
24. Zhang D., Zhu L. Effects of Tween 80 on the removal, sorption and biodegradation of pyrene by *Klebsiella oxytoca* PYR-1 // Environmental Pollution. 2012. Vol. 16. P. 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.036>.
25. Fainerman V. B., Möbius D., Miller R. Studies in interface science // Surfactants. Chemistry, Interfacial Properties, Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. 661 p.
26. Raffa P., Wever D. A. Z., Picchioni F., Broekhuis A. A. Polymeric surfactants: synthesis, properties, and links to applications // Chemical Reviews. 2015. Vol. 115. P. 8504–8563. <https://doi.org/10.1021/cr500129h>.
27. Gao Y. Z., Ling W. T., Zhu L. Z., Zhao B. W., Zheng Q. S. Surfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated with hydrophobic organic contaminants: potential and assessment // Pedosphere. 2007. Vol. 7. P. 409–418. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60050-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60050-2).
28. Miller U., Sówka I., Adamiak W. The use of surfactant from the tween group in toluene biofiltration // Archives of Environmental Protection. 2020. Vol. 46. P. 53–57. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.133474>.
29. Lv K., Jia K., Yang Y., Huang W., Wu H., Pan W., et al. Effects of additional salts on the interfacial tension of crude oil/zwiterionic gemini surfactant solutions // Journal of Dispersion Science and Technology. 2019. Vol. 40, no. 7. P. 1031–1038. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1494606>.
30. Farias M. L., Campos E. F., Souza A. L. S., Carvalho M. S. Injection of dilute oil-in-water emulsion as an enhanced oil recovery method for heavy oil: 1D and 3D flow configurations // Transport in Porous Media. 2016. Vol. 113. P. 267–281. <https://doi.org/10.1007/s11242-016-0692-0>.
31. Yu L., Dong M. Z., Ding B. X., Yuan Y. G. Experimental study on the effect of interfacial tension on the conformance control of oil-in-water emulsions in heterogeneous oil sands reservoirs // Chemical Engineering Science. 2018. Vol. 189. P. 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.033>.
32. Feng H. S., Kang W. L., Zhang L. M., Chen J., Li Z., Zhou Q., et al. Experimental study on a fine emulsion flooding system to enhance oil recovery for low permeability reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 171. P. 974–981. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.011>.
33. Liu H., Zhang Y., Li Y., Hou J., Liu Y. Influence on emulsification in binary flooding of oil displacement effect // Journal of Dispersion Science and Technology. 2016. Vol. 37. P. 89–96. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1029583>.
34. Bera A., Kumar T., Ojha K., Mandal A. Screening of microemulsion properties for application in enhanced oil recovery // Fuel. 2014. Vol. 121. P. 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.051>.
35. Bera A., Mandal A., Kumar T. Physicochemical characterization of anionic and cationic microemulsions: water solubilization, particle size distribution, surface tension, and structural parameters // Journal of Chemical & Engineering Data. 2014. Vol. 59. P. 2490–2498. <https://doi.org/10.1021/je500274r>.
36. Kumar N., Mandal A. Thermodynamic and physicochemical properties evaluation for formation and characterization of oil-in-water nanoemulsion // Journal of Molecular Liquids. 2018. Vol. 266. P. 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.069>.
37. Sharma S. C., Warr G. G. Phase behavior, self-assembly, and emulsification of tween 80/water mixtures with limonene and perfluoromethyldecalin // Langmuir. 2012. Vol. 28. P. 11707–11713. <https://doi.org/10.1021/la300942f>.
38. Doryani H., Kazemzadeh Y., Parsaei R., Malayeri M. R., Riazi M. Impact of asphaltene and normal paraffins on methane-synthetic oil interfacial tension: an experimental study // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 26. P. 538–548. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.048>.
39. Lashkarbolooki M., Ayatollahi S. Effect of asphaltene and resin on interfacial tension of acidic crude oil/sulfate aqueous solution: experimental study // Fluid Phase Equilibria. 2016. Vol. 414. P. 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.01.032>.
40. Lashkarbolooki M., Ayatollahi S. Effects of asphaltene, resin and crude oil type on the interfacial tension of crude oil/brine solution // Fuel. 2018. Vol. 223. P. 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.029>.
41. Lashkarbolooki M., Ayatollahi S. The effects of pH, acidity, asphaltene and resin fraction on crude oil/water interfacial tension // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 162. P. 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.061>.
42. Lashkarbolooki M., Riazi M., Ayatollahi M., Hezave A. Z. Synergy effects of ions, resin, and

- asphaltene on interfacial tension of acidic crude oil and low-high salinity brines // *Fuel*. 2016. Vol. 165. P. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.030>.
43. Sharma P., Kostarelou K., Palayangoda S. S. Hydrocarbon recovery from oil sands by cyclic surfactant solubilization in single-phase microemulsions // *Journal of Energy Resources Technology*. 2019. Vol. 141. P. 085001. <https://doi.org/10.1115/1.4042715>.
44. Masrat R., Maswal M., Dar Ahmad A. Competitive solubilization of naphthalene and pyrene in various micellar systems // *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 244–245. P. 662–670. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.057>.
45. Sales P. S., de Rossi R. H., Fernandez M. A. Different behaviours in the solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in water induced by mixed surfactant solutions // *Chemosphere*. 2011. Vol. 84. P. 1700–1707. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.04.073>.
46. Bidoia E., Montagnoli R. Toxicity and biodegradation testing, methods in pharmacology and toxicology. Totowa: Humana Press, 2018. 394 p.
47. Smulek W., Kaczorek E., Hricoviniova Z. Alkyl xylosides: physico-chemical properties and influence on environmental bacteria cells // *Journal of Surfactants and Detergents*. 2017. Vol. 20. P. 1269–1279. <https://doi.org/10.1007/s11743-017-2012-2>.
48. Wang L., Sha Y., Wu D., Wei Q., Chen D., Yang Sh., et al. Surfactant induces ROS-mediated cell membrane permeabilization for the enhancement of mannate production // *Process Biochemistry*. 2020. Vol. 91. P. 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.12.009>.
49. Ostroumov S. A., Solomonova E. A. Phytotoxicity of a surfactant-containing product towards macrophytes // *Russian Journal of General Chemistry*. 2013. Vol. 83. P. 2614–2617. <https://doi.org/10.1134/S1070363213130057>.
50. Поклонов В. А., Остроумов С. А. Влияние синтетических поверхностно-активных веществ на бобовые культуры // *Экологическая химия*. 2019. Т. 28. № 5. С. 244–249.
51. Al-Jamala O., Al-Jighefee H., Younes H., Abidin R., Al-Asmakh M. A., Radwan A. B. et al. Organ-specific toxicity evaluation of stearamidopropyl dimethylamine (SAPDMA) surfactant using zebrafish embryos // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 741. P. 140450. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140450>.
52. Cheng M., Zeng G., Huang D., Lai C., Xu P., Zhang Ch., et al. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 284. P. 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.001>.
53. Zhou W., Zhu L., Chen B., Tao S., Chiou C. T. Interactions of organic contaminants with mineral-adsorbed surfactants // *Environmental Science & Technology*. 2003. Vol. 37. P. 4001–4006. <https://doi.org/10.1021/es026326k>.
54. Paria S. Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 138. P. 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.11.001>.
55. Aken B. V., Correa P. A., Schnoor J. L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises // *Environmental Science & Technology*. 2009. Vol. 44. P. 2767–2776. <https://doi.org/10.1021/es902514d>.
56. Mao X., Jiang R., Xiao W., Xiao W., Yu J. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: a review // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 285. P. 419–435. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.009>.
57. Bradl H. B. Interface science and technology // *Heavy Metals in the Environment: Origin, Interaction and Remediation*. Amsterdam: Elsevier, 2005. 269 p.
58. Mathurasa L., Tongcumpou C., Sabatini D., Luepromchai E. Anionic surfactant enhanced bacterial degradation of tributyltin in soil // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2012. Vol. 75. P. 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.06.027>.
59. Rodrigues A., Nogueira R., Melo L., Brito A. Effect of low concentrations of synthetic surfactants on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) biodegradation // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013. Vol. 83. P. 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.04.001>.
60. Jafvert C. T., Heath J. K. Sediment- and saturated-soil-associated reactions involving an anionic surfactant (dodecylsulfate). Precipitation and micelle formation // *Environmental Science & Technology*. 1991. Vol. 25, no. 6. P. 1031–1038. <https://doi.org/10.1021/es00018a003>.
61. Wang P., Keller A. A. Particle-size dependent sorption and desorption of pesticides within a water-soil-nonionic surfactant system // *Environmental Science & Technology*. 2008. Vol. 42. P. 3381–3387. <https://doi.org/10.1021/es702732g>.
62. Bautista L. F., Sanz R., Molina M. C., González N., Sánchez D. Effect of different non-ionic surfactants on the biodegradation of PAHs by diverse aerobic bacteria // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2009. Vol. 63. P. 913–922. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.06.013>.
63. Seo Y., Bishop P. L. Influence of nonionic surfactant on attached biofilm formation and phenanthrene bioavailability during simulated surfactant enhanced bioremediation // *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41. P. 7107–7113. <https://doi.org/10.1021/es0701154>.
64. Wolf D. C., Gan J. Influence of rhamnolipid biosurfactant and Brij-35 synthetic surfactant on 14C-Pyrene mineralization in soil // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 243. P. 1846–1853. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.031>.
65. Wang S., Poon K., Cai Z. Removal and metabolism of triclosan by three different microalgal species in aquatic environment // *Journal of Hazardous Materials*. 2018. Vol. 342. P. 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.004>.
66. Martínez L. M. T., Kharissova O. V., Khari-sov B. I. Handbook of ecomaterials. New York: Springer, 2019. 46 p.
67. Corcellas C., Eljarrat E., Barceló D. First re-

port of pyrethroid bioaccumulation in wild river fish: a case study in Iberian river basins (Spain) // *Environment International*. 2015. Vol. 75. P. 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.007>.

68. Dar M. A., Kaushik G., Villarreal-Chiu J. F. Pollution status and bioremediation of chlorpyrifos in environmental matrices by the application of bacterial communities: a review // *Journal of Environmental Science and Management*. 2019. Vol. 239. P. 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.048>.

69. Kumar S., Kaushik G., Dar M. A., Nimesh S., López-Chuken U. J., Villarreal-Chiu J. Microbial degradation of organophosphate pesticides: a review // *Pedosphere*. 2018. Vol. 28. P. 190–208. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60017-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60017-7).

70. Dollinger J., Schacht V. J., Gaus C., Grant S. Effect of surfactant application practices on the vertical transport potential of hydrophobic pesticides in agrosystems // *Chemosphere*. 2018. Vol. 209. P. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06>.

71. Singh A. K., Cameotra S. S. Influence of microbial and synthetic surfactant on the biodegradation of atrazine // *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 21, no. 3. P. 2088–2097. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2127-6>.

72. Rosenberg M. Microbial adhesion to hydrocarbons: twenty-five years of doing MATH // *FEMS Microbiology Letters*. 2006. Vol. 262. P. 129–134. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00291.x>.

73. Banat I. M., Franzetti A., Gandolfi I., Bestetti G., Martinotti M. G., Fracchia L., et al. Microbial biosurfactants production, applications and future potential // *Applied Microbiology Biotechnology*. 2010. Vol. 87. P. 427–444. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2589-0>.

74. Silva E. J., Rocha de Silva N. M., Rufino R. D., Luna J. M., Silva R. O., Sarubbo L. A. Characterization of a biosurfactant produced by *Pseudomonas cepacia* CCT6659 in the presence of industrial wastes and its application in the biodegradation of hydrophobic compounds in soil // *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2014. Vol. 117. P. 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.02.012>.

75. Desai J. D., Banat I. M. Microbial production of surfactants and their commercial potential // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 1997. Vol. 61. P. 47–64. <https://doi.org/10.1128/mmbr.61.1.47-64.1997>.

76. Neu T. R. Significance of bacterial surface-active compounds in interaction of bacteria with interfaces // *Microbiological Reviews*. 1996. Vol. 60. P. 151–166. <https://doi.org/10.1128/mr.60.1.151-166.1996>.

77. Ron E. Z., Rosenberg E. Natural roles of biosurfactants // *Environmental Microbiology*. 2001. Vol. 3, no. 4. P. 229–236. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2001.00190.x>.

78. Timmis K. N. Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology // *Experimental Protocols and Appendices*. Berlin: Springer, 2010. 4637 p.

79. Лыонг Т. М., Нечаева И. А., Петриков К. В., Пунтус И. Ф., Пономарева О. Н. Бактерии-нефтедеструкторы рода *Rhodococcus* – потенциальные

продуценты биосурфактантов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2016. Т. 6. N 1. С. 50–60.

80. Лыонг Т. М., Нечаева И. А., Петриков К. В., Филонов А. Е., Пономарева О. Н. Структура и физико-химические свойства гликолипидных биосурфактантов, продуцируемых бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7. N 2. С. 72–79. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-72-79>.

81. Luong T. M., Ponamareva O. N., Nechaeva I. A., Petrikov K. V., Delean Ya. A., Surin A. K., et al. Characterization of biosurfactants produced by the oil-degrading bacterium *Rhodococcus erythropolis* S67 at low temperature // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2018. Vol. 34, no. 2. P. 20–30. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2401-8>.

82. Лыонг Т. М., Нечаева И. А., Пономарева О. Н., Ву Х. З., Арляпов В. А., Пунтус И. Ф. [и др.]. Влияние температуры на биodeградацию гексадекана бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 – эффективными продуцентами гликолипидных биосурфактантов // *Биотехнология*. 2017. N 6. С. 49–56. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2017-33-6-00-00>.

83. Moldes A. B., Paradelo R., Rubinos D., Devesa-Rey R., Cruz J. M., Barral M. T. Ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil using biosurfactants from *Lactobacillus pentosus* // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. Vol. 59, no. 17. P. 9443–9447. <https://doi.org/10.1021/jf201807r>.

84. Patel K., Patel M. Improving bioremediation process of petroleum wastewater using biosurfactants producing *Stenotrophomonas* sp. S1VKR-26 and assessment of phytotoxicity // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 315. P. 123861. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123861>.

85. Серебренникова М. К., Головина Е. Э., Куюкина М. С., Ившина И. Б. Консорциум иммобилизованных родококков для очистки нефтепромысловой воды в колоночном биореакторе // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2017. Т. 53. N 4. С. 380–386. <https://doi.org/10.7868/S0555109917040122>.

86. Güçlü-Üstündağ Ö., Mazza G. Saponins: properties, applications and processing, critical reviews in food // *Science and Nutrition*. 2007. Vol. 47. P. 231–258. <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>.

87. Kaczorek E., Chrzanowski Ł., Pijanowska A., Olszanowski A. Yeast and bacteria cell hydrophobicity and hydrocarbon biodegradation in the presence of natural surfactants: rhamnolipides and saponins // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 4285–4291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08>.

88. Kobayashi T., Kaminaga H., Navarro R. R., Iimura Y. Application of aqueous saponin on the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soil // *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2012. Vol. 47. P. 1138–1145. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.668106>.

89. Pijanowska A., Kaczorek E., Chrzanowski Ł.,

Olszanowski A. Cell hydrophobicity of *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* spp. bacteria and hydrocarbon biodegradation in the presence of *Quillaya* saponin // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2007. Vol. 23. P. 677–682. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9282-6>.

90. Sun Y., Zou M., Li C., Li X., Mao T., Zheng Ch. The solubilization of naphthalene using tea saponin as a biosurfactant: effect of temperature // *Journal of*

*Molecular Liquids*. 2021. Vol. 335. P. 116475. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116475>.

91. Davin M., Starren A., Deleu M., Lognay G., Colinet G., Fauconnier M.-L. Could saponins be used to enhance bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aged-contaminated soils? // *Chemosphere*. 2018. Vol. 194. P. 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017>.

## REFERENCES

1. García-Delgado C., Marín-Benito J. M., Sánchez-Martín M. J., Rodríguez-Cruz M. S. Organic carbon nature determines the capacity of organic amendments to adsorb pesticides in soil. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;390:122-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122162>.

2. Jin M., Yu X., Yao Z., Tao P., Li G., Yu X., et al. How biofilms affect the uptake and fate of hydrophobic organic compounds (HOCs) in microplastic: insights from an in situ study of Xiangshan Bay, China. *Water Research*. 2020;184:116-118. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116118>.

3. Taylor A. C., Fones G. R., Vrana B., Mills G. A. Applications for passive sampling of hydrophobic organic contaminants in water – a review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2021;51(1):20-54. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1675043>.

4. Trellu C., Mousset E., Pechaud Y., Huguenot D., van Hullebusch E. D., Esposito G., et al. Removal of hydrophobic organic pollutants from soil washing/flushing solutions: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 2016;306:149-174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.008>.

5. Zeng Z., Liu Y., Zhong H., Xiao R., Zeng G., Liu Z., et al. Mechanisms for rhamnolipids-mediated biodegradation of hydrophobic organic compounds. *Science of the Total Environment*. 2018;634:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.349>.

6. Kupryianchik D., Hale S., Zimmerman A. R., Harvey O., Rutherford D., Abiven S., et al. Sorption of hydrophobic organic compounds to a diverse suite of carbonaceous materials with emphasis on biochar. *Chemosphere*. 2016;44:879-887. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.055>.

7. Richard E., Saichek R. E., Reddy K. R. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2005;35:115-192. <https://doi.org/10.1080/10643380590900237>.

8. Trellu C., Pechaud Y., Oturan N., Mousset E., van Hullebusch E. D., Huguenot D., et al. Remediation of soils contaminated by hydrophobic organic compounds: how to recover extracting agents from soil washing solutions? *Journal of Hazardous Materials*. 2021;404:124-137. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124137>.

9. Ashraf S., Ali Q., Ahmad Z. Z., Ashraf S., Asghar N. H. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;174:714-727. <https://doi.org/10.1016/j.eco>

[env.2019.02.068](https://doi.org/10.1016/j.eco).

10. Lu H., Wang W., Li F., Zhu L. Mixed-surfactant-enhanced phytoremediation of PAHs in soil: bioavailability of PAHs and responses of microbial community structure. *Science of the Total Environment*. 2019;653:658-666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.385>.

11. Rodríguez-Campos J., Perales-García A., Hernández-Carballo J., Martínez-Rabelo F., Hernández-Castellanos B., Barois I., et al. Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the combination of three technologies: bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation. *Journal of Soils and Sediments*. 2019;19:1981-1994. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2213-y>.

12. Shi Z., Liu J., Tang Z., Zhao Y., Wang C. Vermiremediation of organically contaminated soils: concepts, current status, and future perspectives. *Applied Soil Ecology*. 2020;147:103377. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103377>.

13. Shishir T. A., Mahbub N., Kamal N. E. Review on bioremediation: a tool to resurrect the polluted rivers. *Pollution*. 2019;5:555-568. <https://doi.org/10.22059/poll.2019.272339.558>.

14. Villela H. D. M., Pexito R. S., Soriano A. U., Carmo F. L. Microbial bioremediation of oil contaminated seawater: a survey of patent deposits and the characterization of the top genera applied. *Science of the Total Environment*. 2019;666:743-758. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.153>.

15. Azubuike C. C., Chikere C. B., Okpokwasili G. C. Bioremediation techniques – classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2016;32:1-18. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>.

16. Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of The Total Environment*. 2020;706:135739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.

17. Kang S., Kim G., Choe J. K., Choi Y. Effect of using powdered biochar and surfactant on desorption and biodegradability of phenanthrene sorbed to biochar. *Journal of Hazardous Materials*. 2019;371:253-260. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.104>.

18. Ghosh I., Mukherji S. Diverse effect of surfactants on pyrene biodegradation by a *Pseudomonas* strain utilizing pyrene by cell surface hydrophobicity induction. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2016;10:67-75. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.12.010>.

19. Stom D. I., Bogdanova I. A., Saksonov M. N., Tolstoy V. M., Yevtushenko L. I., Xie B., et al. The influence of humat on adhesion of cells and spores of microorganisms and their desorption from hydrophobized surfaces. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya = Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*. 2017;21:31-40. (In Russian).
20. Stom D. I., Boyarova N. A., Dagurov A. V., Vyatchina O. F., Saxonov M. N. The possible mechanisms of humic substances biologic effect. *Sibirskii meditsinskii zhurnal = Siberian Medical Journal*. 2008;81(6):76-79. (In Russian).
21. Wei W., Ran Z., He H., Zhou K., Huangfu Z., Yu J. Desorption process and morphological analysis of real polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil by the heterogemini surfactant and its mixed systems. *Chemosphere*. 2020;254:126854. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126854>.
22. Yadav M., Shukla A. K., Srivastva N., Upadhyay S. N., Dubey S. K. Utilization of microbial community potential for removal of chlorpyrifos: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2016;3:727-742. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1015958>.
23. Yanto D. H. Y., Tachibana S. Enhanced biodegradation of asphalt in the presence of tween surfactants,  $Mn^{2+}$  and  $H_2O_2$  by *Pestalotiopsis sp.* in liquid medium and soil. *Chemosphere*. 2014;10:105-113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.044>.
24. Zhang D., Zhu L. Effects of Tween 80 on the removal, sorption and biodegradation of pyrene by *Klebsiella oxytoca* PYR-1. *Environmental Pollution*. 2012;16:169-174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.036>.
25. Fainerman V. B., Möbius D., Miller R. Studies in interface science. In: *Surfactants. Chemistry, Interfacial Properties, Applications*. Amsterdam: Elsevier Science; 2001, 661 p.
26. Raffa P., Wever D. A. Z., Picchioni F., Broekhuis A. A. Polymeric surfactants: synthesis, properties, and links to applications. *Chemical Reviews*. 2015;115:8504-8563. <https://doi.org/10.1021/cr500129h>.
27. Gao Y. Z., Ling W. T., Zhu L. Z., Zhao B. W., Zheng Q. S. Surfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated with hydrophobic organic contaminants: potential and assessment. *Pedosphere*. 2007;7:409-418. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60050-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60050-2).
28. Miller U., Sówka I., Adamiak W. The use of surfactant from the tween group in toluene biofiltration. *Archives of Environmental Protection*. 2020;46:53-57. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.133474>.
29. Lv K., Jia K., Yang Y., Huang W., Wu H., Pan W., et al. Effects of additional salts on the interfacial tension of crude oil/zwitterionic gemini surfactant solutions. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2019;40(7):1031-1038. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1494606>.
30. Farias M. L., Campos E. F., Souza A. L. S., Carvalho M. S. Injection of dilute oil-in-water emulsion as an enhanced oil recovery method for heavy oil: 1D and 3D flow configurations. *Transport in Porous Media*. 2016;113:267-281. <https://doi.org/10.1007/s11242-016-0692-0>.
31. Yu L., Dong M. Z., Ding B. X., Yuan Y. G. Experimental study on the effect of interfacial tension on the conformance control of oil-in-water emulsions in heterogeneous oil sands reservoirs. *Chemical Engineering Science*. 2018;189:165-178. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.033>.
32. Feng H. S., Kang W. L., Zhang L. M., Chen J., Li Z., Zhou Q., et al. Experimental study on a fine emulsion flooding system to enhance oil recovery for lower permeability reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;171:974-981. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.011>.
33. Liu H., Zhang Y., Li Y., Hou J., Liu Y. Influence on emulsification in binary flooding of oil displacement effect. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2016;37:89-96. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1029583>.
34. Bera A., Kumar T., Ojha K., Mandal A. Screening of microemulsion properties for application in enhanced oil recovery. *Fuel*. 2014;121:198-207. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.051>.
35. Bera A., Mandal A., Kumar T. Physicochemical characterization of anionic and cationic microemulsions: water solubilization, particle size distribution, surface tension, and structural parameters. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2014;59:2490-2498. <https://doi.org/10.1021/je500274r>.
36. Kumar N., Mandal A. Thermodynamic and physicochemical properties evaluation for formation and characterization of oil-in-water nanoemulsion. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;266:147-159. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.069>.
37. Sharma S. C., Warr G. G. Phase behavior, self-assembly, and emulsification of tween 80/water mixtures with limonene and perfluoromethyldecalin. *Langmuir*. 2012;28:11707-11713. <https://doi.org/10.1021/la300942f>.
38. Doryani H., Kazemzadeh Y., Parsaei R., Malayeri M. R., Riazi M. Impact of asphaltene and normal paraffins on methane-synthetic oil interfacial tension: an experimental study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;26:538-548. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.048>.
39. Lashkarbolooki M., Ayatollahi S. Effect of asphaltene and resin on interfacial tension of acidic crude oil/sulfate aqueous solution: experimental study. *Fluid Phase Equilibria*. 2016;414:149-155. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.01.032>.
40. Lashkarbolooki M., Ayatollahi S. Effects of asphaltene, resin and crude oil type on the interfacial tension of crude oil/brine solution. *Fuel*. 2018;223:261-267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.029>.
41. Lashkarbolooki M., Ayatollahi S. The effects of pH, acidity, asphaltene and resin fraction on crude oil/water interfacial tension. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;162:341-347. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.12.061>.
42. Lashkarbolooki M., Riazi M., Ayatollahi M., Hezave A. Z. Synergy effects of ions, resin, and asphaltene on interfacial tension of acidic crude oil

- and low-high salinity brines. *Fuel*. 2016;165:75-85. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.030>.
43. Sharma P., Kostarelos K., Palayangoda S. S. Hydrocarbon recovery from oil sands by cyclic surfactant solubilization in single-phase microemulsions. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019;141:085001. <https://doi.org/10.1115/1.4042715>.
44. Masrat R., Maswal M., Dar Ahmad A. Competitive solubilization of naphthalene and pyrene in various micellar systems. *Journal of Hazardous Materials*. 2013;244-245:662-670. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.057>.
45. Sales P. S., de Rossi R. H., Fernandez M. A. Different behaviours in the solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in water induced by mixed surfactant solutions. *Chemosphere*. 2011;84:1700-1707. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.04.073>.
46. Bidoia E., Montagnolli R. *Toxicity and biodegradation testing, methods in pharmacology and toxicology*. Totowa: Humana Press; 2018, 394 p.
47. Smulek W., Kaczorek E., Hricoviniova Z. Alkyl xylosides: physico-chemical properties and influence on environmental bacteria cells. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2017;20:1269-1279. <https://doi.org/10.1007/s11743-017-2012-2>.
48. Wang L., Sha Y., Wu D., Wei Q., Chen D., Yang Sh., et al. Surfactant induces ROS-mediated cell membrane permeabilization for the enhancement of mannate production. *Process Biochemistry*. 2020;91:172-180. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.12.009>.
49. Ostroumov S. A., Solomonova E. A. Phytotoxicity of a surfactant-containing product towards macrophytes. *Russian Journal of General Chemistry*. 2013;83:2614-2617. <https://doi.org/10.1134/S1070363213130057>.
50. Poklonov V. A., Ostroumov S. A. Effect of synthetic surfactants for legumes *Lepidium sativum*, *Phaseolus vulgaris*, *Lens culinaris*, and *Vigna radiata*. *Ekologicheskaya khimiya*. 2019;28(5):244-249. (In Russian).
51. Al-Jamala O., Al-Jighefee H., Younes H., Abdin R., Al-Asmakh M. A., Radwan A. B. et al. Organ-specific toxicity evaluation of stearamidopropyl dimethylamine(SAPDMA) surfactant using zebrafish embryos. *Science of the Total Environment*. 2020;741:140450. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140450>.
52. Cheng M., Zeng G., Huang D., Lai C., Xu P., Zhang Ch., et al. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review. *Chemical Engineering Journal*. 2016;284:582-598. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.001>.
53. Zhou W., Zhu L., Chen B., Tao S., Chiou C. T. Interactions of organic contaminants with mineral-adsorbed surfactants. *Environmental Science & Technology*. 2003;37:4001-4006. <https://doi.org/10.1021/es026326k>.
54. Paria S. Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2008;138:24-58. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.11.001>.
55. Aken B. V., Correa P. A., Schnoor J. L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises. *Environmental Science & Technology*. 2009;44:2767-2776. <https://doi.org/10.1021/es902514d>.
56. Mao X., Jiang R., Xiao W., Xiao W., Yu J. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 2015;285:419-435. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.009>.
57. Bradl H. B. Interface science and technology. In: *Heavy Metals in the Environment: Origin, Interaction and Remediation*. Amsterdam: Elsevier; 2005, 269 p.
58. Mathurasa L., Tongcumpou C., Sabatini D., Luepromchai E. Anionic surfactant enhanced bacterial degradation of tributyltin in soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2012;75:7-14. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.06.027>.
59. Rodrigues A., Nogueira R., Melo L., Brito A. Effect of low concentrations of synthetic surfactants on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) biodegradation. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013;83:48-55. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.04.001>.
60. Jafvert C. T., Heath J. K. Sediment- and saturated-soil-associated reactions involving an anionic surfactant (dodecylsulfate). Precipitation and micelle formation. *Environmental Science & Technology*. 1991;25(6):1031-1038. <https://doi.org/10.1021/es00018a003>.
61. Wang P., Keller A. A. Particle-size dependent sorption and desorption of pesticides within a water-soil-nonionic surfactant system. *Environmental Science & Technology*. 2008;42:3381-3387. <https://doi.org/10.1021/es702732g>.
62. Bautista L. F., Sanz R., Molina M. C., González N., Sánchez D. Effect of different non-ionic surfactants on the biodegradation of PAHs by diverse aerobic bacteria. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2009;63:913-922. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.06.013>.
63. Seo Y., Bishop P. L. Influence of nonionic surfactant on attached biofilm formation and phenanthrene bioavailability during simulated surfactant enhanced bioremediation. *Environmental Science & Technology*. 2007;41:7107-7113. <https://doi.org/10.1021/es0701154>.
64. Wolf D. C., Gan J. Influence of rhamnolipid biosurfactant and Brij-35 synthetic surfactant on 14C-Pyrene mineralization in soil. *Environmental Pollution*. 2018;243:1846-1853. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.031>.
65. Wang S., Poon K., Cai Z. Removal and metabolism of triclosan by three different microalgal species in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials*. 2018;342:643-650. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.004>.
66. Martínez L. M. T., Kharissova O. V., Khari- sov B. I. *Handbook of ecomaterials*. New York: Springer; 2019, 46 p.
67. Corcellas C., Eljarrat E., Barceló D. First report of pyrethroid bioaccumulation in wild river fish: a case study in Iberian river basins (Spain). *Environment International*. 2015;75:110-116. [534](https://doi.org/10.1016/j.</a></li></ol>
</div>
<div data-bbox=)

envint.2014.11.007.

68. Dar M. A., Kaushik G., Villarreal-Chiu J. F. Pollution status and bioremediation of chlorpyrifos in environmental matrices by the application of bacterial communities: a review. *Journal of Environmental Science and Management*. 2019;239:124-136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.048>.
69. Kumar S., Kaushik G., Dar M. A., Nimesh S., López-Chuken U. J., Villarreal-Chiu J. Microbial degradation of organophosphate pesticides: a review. *Pedosphere*. 2018;28:190-208. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60017-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60017-7).
70. Dollinger J., Schacht V. J., Gaus C., Grant S. Effect of surfactant application practices on the vertical transport potential of hydrophobic pesticides in agrosystems. *Chemosphere*. 2018;209:78-87. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06>.
71. Singh A. K., Cameotra S. S. Influence of microbial and synthetic surfactant on the biodegradation of atrazine. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013;21(3):2088-2097. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2127-6>.
72. Rosenberg M. Microbial adhesion to hydrocarbons: twenty-five years of doing MATH. *FEMS Microbiology Letters*. 2006;262:129-134. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00291.x>.
73. Banat I. M., Franzetti A., Gandolfi I., Bestetti G., Martinotti M. G., Fracchia L., et al. Microbial biosurfactants production, applications and future potential. *Applied Microbiology Biotechnology*. 2010;87:427-444. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2589-0>.
74. Silva E. J., Rocha de Silva N. M., Rufino R. D., Luna J. M., Silva R. O., Sarubbo L. A. Characterization of a biosurfactant produced by *Pseudomonas cepacia* CCT6659 in the presence of industrial wastes and its application in the biodegradation of hydrophobic compounds in soil. *Colloids Surf Biointerfaces*. 2014;117:36-41. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.02.012>.
75. Desai J. D., Banat I. M. Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 1997;61:47-64. <https://doi.org/10.1128/mmbr.61.1.47-64.1997>.
76. Neu T. R. Significance of bacterial surface-active compounds in interaction of bacteria with interfaces. *Microbiological Reviews*. 1996;60:151-166. <https://doi.org/10.1128/mr.60.1.151-166.1996>.
77. Ron E. Z., Rosenberg E. Natural roles of biosurfactants. *Environmental Microbiology*. 2001;3(4):229-236. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2001.00190.x>.
78. Timmis K. N. Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology. In: *Experimental Protocols and Appendices*. Berlin: Springer; 2010, 4637 p.
79. Luong T. M., Nechaeva I. A., Petrikov K. V., Puntus I. F., Ponamareva O. N. Oil-degrading microorganisms of genus *Rhodococcus* – potential producers of biosurfactants. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016;6(1):50-60. (In Russian).
80. Luong T. M., Nechaeva I. A., Petrikov K. V., Filonov A. E., Ponamareva O. N. Structure and physicochemical properties of glycolipid biosurfactant, produced by oil-degrading bacteria *Rhodococcus* sp. X5. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(2):72-79. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-72-79>.
81. Luong T. M., Ponamareva O. N., Nechaeva I. A., Petrikov K. V., Delean Ya. A., Surin A. K., et al. Characterization of biosurfactants produced by the oil-degrading bacterium *Rhodococcus erythropolis* S67 at low temperature. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2018;34(2):20-30. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2401-8>.
82. Lyong T. M., Nechaeva I. A., Ponamareva O. N., Vu Kh. Z., Arlyapov V. A., Puntus I. F., et al. The effect of temperature on the biodegradation of hexadecane by the oil-destroying bacteria *Rhodococcus* sp. X5 – effective producers of glycolipid biosurfactants. *Biotekhnologiya*. 2017;(6):49-56. (In Russian). <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2017-33-6-00-00>.
83. Moldes A. B., Paradelo R., Rubinos D., Devesa-Rey R., Cruz J. M., Barral M. T. Ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil using biosurfactants from *Lactobacillus pentosus*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011;59(17):9443-9447. <https://doi.org/10.1021/jf201807r>.
84. Patel K., Patel M. Improving bioremediation process of petroleum wastewater using biosurfactants producing *Stenotrophomonas* sp. S1VKR-26 and assessment of phytotoxicity. *Bioresource Technology*. 2022;315:123861. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123861>.
85. Serebrennikova M. K., Kuyukina M. S., Ivshina I. B., Golovina E. E. A consortium of immobilized rhodococci for oilfield wastewater treatment in a column bioreactor. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 2017;53(4):380-386. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0555109917040122>.
86. Güçlü-Üstündağ Ö., Mazza G. Saponins: properties, applications and processing, critical reviews in food. *Science and Nutrition*. 2007;47:231-258. <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>.
87. Kaczorek E., Chrzanowski Ł., Pijanowska A., Olszanowski A. Yeast and bacteria cell hydrophobicity and hydrocarbon biodegradation in the presence of natural surfactants: rhamnolipides and saponins. *Bioresource Technology*. 2008;99:4285-4291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08>.
88. Kobayashi T., Kaminaga H., Navarro R. R., Iimura Y. Application of aqueous saponin on the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2012;47:1138-1145. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.668106>.
89. Pijanowska A., Kaczorek E., Chrzanowski Ł., Olszanowski A. Cell hydrophobicity of *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* spp. bacteria and hydrocarbon biodegradation in the presence of Quillaya saponin. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2007;23:677-682. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9282-6>.
90. Sun Y., Zou M., Li C., Li X., Mao T., Zheng Ch. The solubilization of naphthalene using tea saponin as a biosurfactant: effect of temperature. *Journal*

*of Molecular Liquids*. 2021;335:116475. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116475>.

91. Davin M., Starren A., Deleu M., Lognay G., Colinet G., Fauconnier M.-L. Could saponins be used

to enhance bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aged-contaminated soils? *Chemosphere*. 2018;194:414-421. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017>.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **И. А. Топчий,**

аспирант, лаборант-исследователь,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация,  
[topchiyi@inbox.ru](mailto:topchiyi@inbox.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-9091-4062>

##### **Д. И. Стом,**

д.б.н., профессор,  
заведующий лабораторией водной токсикологии,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация;  
главный научный сотрудник,  
Байкальский музей СО РАН,  
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,  
Российская Федерация,  
[stomd@mail.ru](mailto:stomd@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

##### **К. Ю. Дони́на,**

аспирант,  
Байкальский музей СО РАН,  
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,  
Российская Федерация,  
[kristina.d95@mail.ru](mailto:kristina.d95@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9795-6794>

##### **С. В. Алферов,**

к.х.н., доцент, заведующий лабораторией  
экологической и медицинской биотехнологии,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92,  
Российская Федерация,  
[s.v.alferov@gmail.com](mailto:s.v.alferov@gmail.com)  
<http://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

##### **И. А. Нечаева,**

к.б.н., доцент, старший научный сотрудник  
лаборатории экологической и медицинской  
биотехнологии,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92,  
Российская Федерация,  
[nechaeva1902@gmail.com](mailto:nechaeva1902@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-2736-080X>

##### **А. Б. Купчинский,**

к.б.н., директор,  
Байкальский музей СО РАН,  
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,  
Российская Федерация,

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Ivan A. Topchiy,**

Postgraduate Student,  
Research Laboratory Assistant,  
Irkutsk State University,  
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation,  
[topchiyi@inbox.ru](mailto:topchiyi@inbox.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-9091-4062>

##### **Devard I. Stom,**

Dr. Sci. (Biology), Professor,  
Head of the Laboratory of Aquatic Toxicology,  
Irkutsk State University,  
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation,  
Chief Researcher,  
Baikal Museum of the SB RAS,  
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,  
Russian Federation,  
[stomd@mail.ru](mailto:stomd@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

##### **Kristina Yu. Donina,**

Postgraduate Student,  
Baikal Museum of the SB RAS,  
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,  
Russian Federation,  
[kristina.d95@mail.ru](mailto:kristina.d95@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9795-6794>

##### **Sergey V. Alferov,**

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Head of the Laboratory of Ecological and Medical  
Biotechnology,  
Tula State University,  
92, Lenin Ave., Tula, 300012,  
Russian Federation,  
[s.v.alferov@gmail.com](mailto:s.v.alferov@gmail.com)  
<http://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

##### **Irina A. Nechaeva,**

Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,  
Senior Researcher,  
Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology,  
Tula State University,  
92, Lenin Ave., Tula, 300012,  
Russian Federation,  
[nechaeva1902@gmail.com](mailto:nechaeva1902@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-2736-080X>

##### **Alexander B. Kupchinsky,**

Cand. Sci. (Biology), Director,  
Baikal Museum SB RAS,  
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,  
Russian Federation,

albor67@mail.ru  
bm@isc.irk.ru  
<http://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

**Б. Н. Огарков,**  
д.б.н., профессор,  
заведующий кафедрой микробиологии  
биолого-почвенного факультета,  
заведующий лабораторией экспериментальной  
биотехнологии НИИ биологии,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация,  
bornik@bk.ru

**Ю. Ю. Петрова,**  
к.х.н., доцент, директор Института естественных  
и технических наук,  
Сургутский государственный университет,  
628412, г. Сургут, ул. Энергетиков, 22,  
Российская Федерация,  
petrova\_juju@surgu.ru  
yyp.71@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

**Е. В. Антонова,**  
к.б.н., доцент,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация,  
antoshki05@rambler.ru  
evantonova@id.isu.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-5681-288X>

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад  
в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили  
окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

*Поступила в редакцию 01.03.2022.  
Одобрена после рецензирования 14.04.2022.  
Принята к публикации 30.11.2022.*

albor67@mail.ru  
bm@isc.irk.ru  
<http://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

**Boris N. Ogarkov,**  
Dr. Sci. (Biology), Professor,  
Head of the Department of Microbiology,  
Head of the Laboratory of Experimental  
Biotechnology,  
Research Institute of Biology,  
Irkutsk State University,  
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation,  
bornik@bk.ru

**Yulia Yu. Petrova,**  
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Director of the Institute of Natural  
and Technical Sciences,  
Surgut State University,  
22, Energetikov St., Surgut, 628412,  
Russian Federation,  
petrova\_juju@surgu.ru  
yyp.71@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

**Elena V. Antonova,**  
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,  
Irkutsk State University,  
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation,  
antoshki05@rambler.ru  
evantonova@id.isu.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-5681-288X>

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests regarding  
the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved  
by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

*The article was submitted 01.03.2022.  
Approved after reviewing 14.04.2022.  
Accepted for publication 30.11.2022.*