



ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

http://ecobiotech-journal.ru



Обзор

НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНОЙ СРЕДЫ: ОСОБЕННОСТИ, ВЛИЯНИЕ НА РАЗЛИЧНЫЕ ОБЪЕКТЫ ГИДРОСФЕРЫ, ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

Коршунова Т.Ю., Логинов О.Н.

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа
E-mail: korshunovaty@mail.ru

Описывается специфика нефтяного загрязнения водной среды, его влияние на водных обитателей, таких как бентос, планктон, рыбы, птицы и млекопитающие. Кратко раскрываются особенности механических, термических, физико-химических методов очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов. Особое внимание уделяется биологическим методам с использованием микроорганизмов, преимуществами которых являются эффективность, экономичность, экологическая безопасность и отсутствие вторичных загрязнений.

Ключевые слова: нефтяная пленка, токсикант, диспергатор, сорбент, биопрепарат

OIL POLLUTION OF WATER ENVIRONMENT: FEATURES, INFLUENCE ON VARIOUS OBJECTS OF HYDROSPHERE, MAIN METHODS FOR CLEANING

Korshunova T.Yu., Loginov O.N.

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Ufa
E-mail: korshunovaty@mail.ru

Describes the specificity of oil pollution of the water environment, its effect on water inhabitants such as benthos, plankton, fish, birds and mammals. The features of mechanical, thermal, physic-chemical methods for cleaning water object from oil and oil products are briefly disclosed. Special attention is paid to microbiological methods, the advantages of which are efficiency, efficiency, environmental safety and the absence of secondary pollution.

Keywords: slick, toxicant, dispersant, sorbent, biological product

Поступила в редакцию: 24.05.2019

[DOI: 10.31163/2618-964X-2019-2-2-157-174](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-2-157-174)

ОСОБЕННОСТИ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ

Нефтяное загрязнение является одним из ведущих факторов антропогенного воздействия на водные экосистемы. Ежегодно в Мировой океан попадает по разным оценкам от 0,5 до 11 млн. т нефти и нефтепродуктов [Гуслинский, 2011; Владимиров, 2014; Патин, 2017; Янковский и др., 2017]. Однако вопреки распространенному мнению, аварийные разливы, вызванные добычей и транспортировкой, не являются главным источником загрязнения Мирового океана. Их вклад составляет менее 10% от суммарного потока углеводородов в морскую среду. Первый по значимости (около 50%) канал поступления нефти имеет природное происхождение и объясняется в основном с ее выходом из трещин и разломов морского дна. Порядка 30% от общего нефтесодержания связано с судоходством. Сюда входят как штатные операции (сброс льяльных и балластных вод, очистка судов и др.) так, и аварийные ситуации, и нелегальные сбросы судовых нефтяных отходов. Еще около 10% обеспечивается за счет переноса с суши по рекам, деятельности на берегу, связанной с потреблением, хранением и переработкой нефти, а также с удалением в прибрежные воды нефтесодержащих отходов разного состава и происхождения [Патин, 2017].

Несколько иная картина складывается для пресноводных водоемов, главной причиной увеличения содержания углеводородов в которых являются аварии на объектах добычи и транспортировки нефти [Карпович, Масленникова, 2013]. Второй по значимости

загрязнитель водных объектов – сточные воды, содержащие различные углеводороды. Утечка нефтяных компонентов происходит также за счет миграции и рассеяния при обычной эксплуатации нефтепромысловых объектов [Назаров, Назаров, 2013]. Источником загрязнения, не связанным с нефтедобычей, является водный транспорт и коммунально-бытовая деятельность. Также углеводороды поступают в водоемы и в ходе выпадения атмосферных осадков, с поверхностным стоком в результате дренирования торфов и почв [Кульков и др., 2010; Моисеенко и др., 2012; Паничева и др., 2012; Кузнецов, Федоров, 2014; Московченко, Убайдуллаев, 2014]. По мнению некоторых авторов, вклад естественных процессов в загрязнение нефтью пресных водоемов может достигать 50% [Кузнецов, Федоров, 2014; Московченко, Убайдуллаев, 2014].

Нефть, попадая в водный объект, достаточно быстро (часы и сутки) перестает существовать как исходный субстрат и распределяется на агрегатные фракции (формы нахождения), одной из которых является пленка (слик). Она тонким слоем локализуется на поверхности, приводя к нарушению газо-, энерго-, тепло- и влагообмена между атмосферой и гидросферой [Караев, Шихалиев, 2014; Патин, 2017]. Это не только негативно сказывается на физических, химических и гидробиологических условиях водной среды и жизнедеятельности ее обитателей, но и способно серьезно повлиять на климат и кислородный баланс в атмосфере Земли, а значит, ухудшить экологическую обстановку на планете в целом и жизнь человека, в частности.

Помимо нефтяной пленки, углеводороды присутствуют в воде в растворенном или эмульгированном виде, а тяжелые фракции оседают на дно [Патин, 2008; Воробьев, 2013; Thibodeaux et al., 2011]. Попав в воду, нефть подвергается переносу на поверхности и в толще воды (растекание, дрейф, седиментация, затопление), с ней происходит ряд превращений (испарение, растворение, диспергирование, эмульгирование, окисление, биодеградация), в ходе которых она меняет свои физические и химические свойства. Скорость этих процессов определяется количеством и составом нефти, особенностями углеводородов (плотность, вязкость), а также условиями водной среды, временем года и преобладающими погодными условиями [Паничева и др., 2012; Воробьев, 2013; Немировская, 2013, 2015; Немировская и др., 2015, 2016; Леонов и др., 2016, 2017; Патин, 2017]. Характерной чертой распределения нефти в воде является неоднородность ее содержания в водных экосистемах, локализация на границе раздела воды с атмосферой, дном (донные осадки) и берегом.

Самоочищение поверхностных вод от нефтяного загрязнения протекает под действием физических, химических и биологических факторов. Однако за счет первых двух происходят лишь частичные изменения в составе нефти и нефтепродуктов без полной деструкции. Ведущее место в процессе самоочищения водоемов принадлежит биологическим факторам, среди которых решающую роль играют углеводородокисляющие микроорганизмы (УОМ). Благодаря их деятельности нефть трансформируется до простых соединений, происходит накопление нового органического вещества и дальнейшее включение его в круговорот углерода в водоемах. На этом основан метод биологической очистки с применением препаратов, содержащих УОМ.

ВЛИЯНИЕ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА РАЗЛИЧНЫЕ ОБЪЕКТЫ ГИДРОСФЕРЫ

Нефть и нефтепродукты являются наиболее опасными загрязнителями водной среды, которые затрудняют все виды водопользования, оказывают отрицательное воздействие на

трофические связи и круговороты веществ, загрязняют берега рек и озер, побережья морей и океанов – места обитания многих растений и животных, приводят к ухудшению физических (цвет, рН, вязкость) и органолептических (вкус, запах) свойств воды.

В токсикологическом отношении нефть – это неспецифический групповой токсикант переменного состава, который относится к категории слаботоксичных и/или умеренно токсичных веществ. Наибольшую опасность для живых организмов представляют растворимые моноциклические ароматические углеводороды и устойчивые высокомолекулярные полиароматические углеводороды (ПАУ). Большинство видов водной фауны особенно уязвимы к действию нефти на ранних стадиях своего развития (икра, личинки, молодь) [Технический информационный..., 2011].

В целом, тяжесть биологических последствий нефтяных разливов зависит от типа (легкая, средняя, тяжелая) и количества нефти, природной характеристики района где произошла авария (геоморфология побережья, климат, глубина, тип осадков и пр.), текущей гидрометеорологической ситуации (температура, скорость течения, ветер, время года и др., а также видового состава, распределения, численности и других показателей состояния местной фауны и флоры.

К числу наиболее характерных проявлений вредного влияния нефти на водные организмы относят [Патин, 2017]:

- поражающие эффекты при непосредственном физическом контакте нефти с организмами, которые наиболее ярко проявляются при соприкосновении птиц и млекопитающих с пленкой нефти, а также в условиях хронического нефтяного загрязнения донных осадков;

- прямую и быструю интоксикацию при сильном нефтяном загрязнении, что характерно для легких типов нефти с повышенным содержанием растворимых низкомолекулярных аренов;

- сублетальные (стрессовые) нарушения физиолого-биохимических, поведенческих и других жизненно важных процессов;

- накопление углеводородов в промысловых организмах с появлением в них нефтяных запахов и привкусов. Например, содержание в воде нефтепродуктов выше 0,1 мг/л придает мясу рыбы неустранимый при любых технологических обработках привкус и специфический запах нефти [Демьянова и др., 2013].

Следует отметить, что в целом, вредное действие нефти на водных обитателей может определяться не только и не столько интоксикацией организмов, сколько прямым физическим контактом с живыми организмами на поверхности водоемов и на берегах, а также нарушением их местообитаний. Попав в водную среду, нефть распределяется по ее профилю и оказывает влияние на все группы организмов, обитающих как в поверхностном слое, так и в толще воды и в донных осадках.

Орнитофауна. Наиболее экологически опасная миграционная форма нефти – пленка. А самым уязвимым при такой форме нефтяного загрязнения элементом экосистем являются водоплавающие птицы [Дубина, Катин, 2012; Haneу et al., 2014; Fox et al., 2016]. Попадание нефти на оперение птиц приводит к переохлаждению, снижению плавучести, способности летать и добывать себе корм и часто заканчивается их гибелью. При попытках удалить клювом загрязнение нефть заглатывается, что может привести к застою в легких, кишечному или легочному кровотечению, пневмонии, а также нарушениям работы печени и почек [Дягилец и др., 2014]. По возвращении птицы в гнездо нефть с оперения переносится на птенцов или на высиживаемые яйца. Последнее грозит истончением скорлупы,

невылуплением потомства или нарушениями в его развитии [Технический информационный..., 2011; Григорьев и др., 2014]. Тяжесть последствий нефтяных разливов для популяций птиц определяется главным образом не количеством нефти, а ее нахождением в районах и местах их массового скопления в сезоны размножения или массовой миграции. При прочих равных условиях, чем ниже температуры воды и воздуха, тем выше риск летальных исходов для птиц [Патин, 2008].

Водные **млекопитающие** гибнут в основном за счет потери мехом теплоизоляционных свойств от соприкосновения с нефтью [Говорушко, 2011].

Ихтиофауна. Многие рыбы, обитающие на глубине менее 100 м, способны избегать мест загрязнения. Негативные последствия более вероятны для придонных видов и молоди рыб при нефтяных разливах в прибрежной мелководной части моря и в зонах слабой циркуляции воды. Тяжесть воздействия резко возрастает, если разлив совпадает по времени и месту с массовым и локализованным на мелководье нерестом рыб [Патин, 2017; Langangen et al., 2017; Carroll et al., 2018]. Содержащиеся в воде углеводороды, попадая на эпителий жабр, могут вызывать нарушения водного и солевого обмена, дыхания, расстройства нервной системы, замещение печеночной ткани фиброзной, эрозию плавников, замедление роста [Каниева, Федорова, 2014; Fodrie et al., 2014]. Биоаккумуляция углеводородов зависит от их гидрофобных и липофильных свойств, поэтому они сосредотачиваются в органах и тканях с повышенным содержанием жиров, например, гонадах и пищеварительных железах, в жировых отложениях [Патин, 2008; Умербаева, Попова, 2014; Harvey et al., 2014; Murawski et al., 2014; Al-Saad et al., 2017]. Кроме прямого токсического действия, резкое сокращение численности ихтиофауны может быть связано уничтожением в результате загрязнения кормовой базы [Патин, 2017; Langangen et al., 2017].

Планктон является основой большинства пищевых цепей в море и включает микроорганизмы, фитопланктон (маленькие, часто одноклеточные водоросли) и зоопланктон (мелкие ракообразные, медузы и пр.), яйца и личинки беспозвоночных и рыб. Самая большая плотность планктона наблюдается в прибрежных водах, где концентрация биогенных веществ достаточно высока. Образующие его организмы относительно чувствительны к токсическим эффектам углеводородов, особенно к водорастворимым фракциям и небольшим каплям нефти. Тем не менее, планктон достаточно быстро возвращается к нормальной плотности и составу после того, как концентрация нефти в воде падает. Такая высокая скорость восстановления связана с коротким временем смены поколений, большим количеством яиц и личинок, распределением на больших площадях и быстрым водообменом [Последствия разливов..., 2015; Jiang et al., 2010; Hing et al., 2011; Huang et al., 2011; Romero-Lopez et al., 2012; Ozhan et al., 2014].

Бентос. Содержащие наиболее устойчивые к биологическому разложению нефтяные углеводороды, донные осадки отличаются скудным видовым разнообразием при высокой численности выносливых к загрязнению форм. Так, содержание нефти в количестве 16,72 г/кг в донных отложениях не вызывало гибели червей-тубифицид, отмечалось даже появление молоди (Воробьев, 2013). Однако по некоторым данным [Лозовой, 2012], нефть и нефтепродукты провоцировали нарушения газового и фильтрационного процессов у бентосных беспозвоночных, изменение дыхательного и сердечного ритмов, поведенческих реакций. Главными изменениями внутренних органов моллюсков рода *Unio* под влиянием различных концентраций нефти являлись нарушения строения эпителиальной ткани жабр, кишечника, почечного мешка [Клишин и др., 2015, 2016]. По мнению С.А. Патина [Патин, 2017], среди всех групп морского зообентоса самой высокой устойчивостью к действию

нефти отличаются некоторые виды полихет (многощетинковые черви), нематод (круглые черви) и двустворчатых моллюсков (мидии), а организмы, которые наиболее быстро элиминируются в условиях сильного нефтяного загрязнения – ракообразные (особенно амфиподы), некоторые иглокожие, брюхоногие моллюски (гастроподы) и усоногие раки (балянусы). Отмечается относительно высокая устойчивость макрофитов, особенно бурых водорослей и ламинарий, к действию нефти, что объясняется защитным действием слизистого покрова на поверхности растений и способностью к прямому размножению с помощью плавающих в воде спор. Кроме того, возможность длительного существования бурой водоросли *Fucus vesiculosus* в условиях нефтяного загрязнения обеспечивается включением углеводов в метаболизм растительных клеток и присутствием на поверхности талломов УОМ [Воскобойников, Пуговкин, 2012; Патин, 2017].

Рост концентрации нефтяных углеводов в донных грунтах приводит к изменению структуры бентоценоза и снижению видового разнообразия в реках [Холмогорова, 2009; Галинуров и др., 2011]. Аналогичные результаты получены для морских бентосных сообществ, для большинства из которых, однако характерно достаточно быстрое восстановление [Lee, Lin, 2013; Castège et al., 2014; Ferrando et al, 2015]. Негативное действие нефти на бентос проявляется как в результате физического контакта с углеводородами в донных осанках, так и за счет токсических свойств растворенных в морской воде или аккумулялированных в донных осадках поллютантов [Кириевская, 2017].

Бентосные беспозвоночные в силу менее развитых по сравнению с рыбами ферментных и метаболических систем, а также за счет высокой фильтрационной активности и обитания на дне обладают, как правило, повышенной способностью к накоплению нефтяных соединений [Воробьев, 2006; Ларин и др., 2009]. Наибольшей способностью аккумулялировать ПАУ без их заметного метаболического разложения в тканях отличаются двустворчатые моллюски-фильтраторы [Патин, 2017].

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДОЕМОВ ОТ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Очистка водных объектов является одной из самых сложных и трудоемких задач при ликвидации последствий загрязнения нефтью и нефтепродуктами, что связано с динамичностью водной среды и сложностью процессов трансформации углеводородов в ней.

В распоряжении служб по борьбе с разливами нефти и нефтепродуктов имеется разнообразный набор методов, которые делятся на 4 основные группы: механические, термические, физико-химические и биологические [Привалова и др., 2015; Долгополова, Патрушева, 2016; Двадненко, Привалова, 2017; Asadpour et al., 2013; Hoang et al., 2018].

Первоочередной мерой при ликвидации аварий на воде является **механический** сбор нефти, который наиболее эффективен в первые часы после разлива, пока толщина нефтяного слоя остается еще достаточно большой. Со временем под воздействием ветра и течения происходит растекание и дрейф пятна, его площадь увеличивается, а толщина уменьшается, что значительно затрудняет процесс отделения нефти от воды. К числу недостатков механических методов относится и то, что данная технология не решает проблему полностью и после сбора на поверхности остается более 30% нефти, а при использовании всасывающих устройств, они поглощают значительное количество воды, содержащей нефтепродукты в различных состояниях (плавающие, эмульгированные и пр.). Чтобы вернуть ее обратно в водоем требуется дополнительная очистка, а это существенно

удорожает процесс. Достоинствами метода является возможность утилизации собранной нефти и минимальный урон, наносимый экосистеме [Кахраманлы, 2013; Hoang et al., 2018].

Для очистки воды механическими способами применяют либо стационарный сбор нефти с помощью бонов и нефтесборщиков для локализации и удаления нефтяных пятен, либо передвижные скиммеры – специальные устройства, которые отводят, собирают поллютант с поверхности, перекачивают его с помощью насоса в накопительный бак [Лобанова, Угланова, 2016].

Термический метод является экологически небезопасным и основан на выжигании нефти. Он применяется при толщине слоя не менее 3 мм (иначе из-за охлаждающего действия воды нефть гореть не будет) и непосредственно сразу после загрязнения до образования эмульсии с водой [Hoang et al., 2018].

Физико-химические методы ликвидации разливов нефти базируются на использовании реагентов-диспергентов и сорбентов. Диспергирующие средства разрушают сплошную нефтяную пленку и ускоряют процесс диффузии нефти в водную толщу, восстанавливают водо-, газо-, энергообмен с атмосферой, тем самым приводя к усилению биодеградации. С помощью этих веществ можно быстро и эффективно снизить ущерб от загрязнения для птиц, обитающих на поверхности и для растительности на побережье. Однако большинство препаратов не способно разрушать очень вязкие нефтепродукты и стойкие эмульсии. К тому же, в качестве диспергентов используются различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), большинство из которых являются высокотоксичными соединениями, и их отрицательное воздействие на морские организмы иногда бывает более существенным, чем самой нефти (Fulmer, Hamdan, 2010; Kleindienst et al., 2015; Hoang et al., 2018). Перспективным направлением развития этого метода является использование биосурфактантов (биоПАВ), продуцируемых микроорганизмами. Способность к образованию биоПАВ выявлена у широкого круга микроорганизмов – это представители родов *Rhodococcus*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Candida*, *Nocardia*, *Bacillus*, *Torulopsis*, *Ochrobactrum*, *Gordonia* и др. [Пирог и др., 2015, 2016; Льюнг и др., 2016, 2017; Петриков и др., 2017; Ángeles, Refugio, 2013; Joshi, Shekhawat, 2014; Bezza et al., 2015; Biosurfactants..., 2015a, 2015b; Pirog et al., 2015; Freitas et al., 2016; Barakat et al., 2017; Bezza, Chirwa, 2017; Santos et al., 2017; Sharma, Oberoi, 2017].

В отличие от своих синтетических аналогов, биосурфактанты менее токсичны, обладают высокой биоразлагаемостью, поэтому быстро элимируются в окружающей среде, активны в меньших концентрациях, синтезируются микроорганизмами из возобновляемого сырья (например, из отходов пищевой промышленности), а также не теряют активность при экстремальных значениях температуры, солёности, pH [Петриков и др., 2017; Marchant, Vanat, 2012; Kapadia, Yagnik, 2013; Santos et al., 2013; Sarrubo et al., 2015; Shah et al., 2016].

Сорбционный метод удаления нефти заключается в нанесении и последующем сборе сорбента. Его преимуществом является высокая эффективность при пленках толщиной менее 1 мм, а ограничения связаны с малым радиусом действия и постепенным изменением сорбционных свойств материалов, громоздкостью сорбентов при хранении и транспортировке, а также с необходимостью сбора и утилизации большого количества нефтенасыщенного сорбента [Гуславский, 2011; Долгополова, Патрушева, 2016; Asadpour et al., 2013]. Для результативного применения сорбентов они должны обладать определенными качествами, такими как гидрофобность, высокая нефтеёмкость, плавучесть, способность к удерживанию нефти при удалении сорбента с акватории, легкость утилизации или биоразлагаемость, устойчивость к разрушению в водной среде, возможность

многократной регенерации, простота эксплуатации, эффективность работы в широком диапазоне температур, нетоксичность, оптимальная стоимость [Бойко и др., 2013; Мязин, 2017; Сулименко и др., 2017; Asadpour et al., 2013].

Сорбенты из природных материалов экологически чистые и дешевые, т.к. зачастую они являются отходами какого-либо производства (лузга подсолнечника, скорлупа кедрового ореха, древесные опилки, отходы ватного производства, кокосовое и пальмовое волокно, рисовая шелуха и пр.) или относительно доступны (уголь, цеолит, вермикулит, торф) [Привалова и др., 2017]. Однако они тонут вместе с сорбированной нефтью, становясь источником вторичного загрязнения, имеют невысокую сорбционную ёмкость (менее 10 г нефти/г сорбента), с трудом удерживают легкие фракции нефти (бензин, дизельное топливо) и подвержены микробиологическому разложению при их хранении [Бурлака, Бруяка, 2017; Asadpour et al., 2013; Bazargan et al., 2014; Idris et al., 2014]. Для ликвидации этих недостатков их модифицируют различными способами, в основном, придавая им гидрофобные свойства [Гесс и др., 2016; Коновалов, 2016; Пыстина и др., 2018; Teli, Valia, 2013; Li et al., 2015; Chai et al., 2016; Onwuka et al., 2016; Alpha et al., 2017; Oribayo et al., 2017].

Синтетические сорбенты (полипропилен, полиуретан, пенополистирол, резиновая крошка и пр.) обладают хорошей поглотительной способностью, однако отличаются большей стоимостью и сложностью утилизации в силу высокой токсичности продуктов горения.

Большинство применяемых на практике технологий механической и физико-химической очистки воды от нефти и нефтепродуктов многостадийны, трудоемки, связаны с большими материальными затратами и не обеспечивают полного удаления загрязнителя с поверхности, не говоря уже об углеводородах, растворенных или эмульгированных в воде [Долгополова, Патрушева, 2016].

На сегодняшний день большое внимание привлекают **биологические методы** очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов, преимуществами которых являются эффективность, экономичность, экологическая безопасность и отсутствие вторичных загрязнений. Для этих целей применяют водные организмы-фильтраторы (малощетинковые черви, мидии) [Воробьев, 2013; Гудимов, 2013; 2014], водные растения (эйхорния, водный мох, элодея, ряска, уруть, рдест, роголистник) [Кручинин и др., 2012; Заводская, Копнина, 2013; Пайдулова, Турковская, 2015; Денисова, 2016; Степанова и др., 2017; Gagnon et al., 2012; Allam et al., 2016; Ateia et al., 2016] и углеводородокисляющие микроорганизмы. Последним принадлежит ведущая роль в процессе очистки воды, т.к. только они способны разлагать нефть и ее производные до безопасных конечных продуктов – углекислого газа и воды. Углеводороды, попадающие в водные экосистемы, являются источниками углерода и энергии для УОМ, тем самым способствуя увеличению их численности при наличии благоприятных условий для роста и развития. В свою очередь, микроорганизмы, используемые для ликвидации нефтяных разливов на воде, являются пищей для планктона и других организмов, поддерживая, таким образом, определенные трофические связи.

Среди УОМ, обитающих в морской среде, обнаружены представители бактерий (pp. *Corynebacterium*, *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Alcanivorax*, *Archrobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Coryneforms*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Frankia*, *Nocardiosis*, *Brevibacterium*, *Actinomadura*, *Mycobacterium*, *Alteromonas*, *Oleispira*, *Colwellia*, *Cycloclasticus*), цианобактерий (pp. *Agmenellum*, *Aphanocapsa*, *Lyngbya*, *Microcoleus*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Plectonema*), грибов (pp. *Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Penicillium*, *Mucor*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Amorphotheca*) и

водорослей (р. *Chlorella*) [Гоголева, Немцева, 2012; Тимергазина, Переходова, 2012; Шубаков и др., 2012; Семенов и др., 2014; Brakstad et al., 2015; Xue et al., 2015; Hazen et al., 2016; Marelli et al., 2017].

На сегодняшний день разработано большое количество биопрепаратов («Деворойл», «Дестройл», «Родер», «Биоойл», биопрепараты серии «Ленойл»®) для очистки водных поверхностей от нефти и нефтепродуктов, как на основе монокультур, так и на основе ассоциаций УОМ [Борзенков и др., 1994; Ихсанов, Ихсанова, 2000; Мурыгина и др., 2001; Алексеев и др., 2008; Логинов и др., 2015]. Они дополнительно могут содержать ферменты и биосурфактанты, способные ускорять процессы естественного разложения за счёт быстрого расщепления молекул загрязнителя, облегчая тем самым их усвоение микроорганизмами, а также включать в состав различные носители, сорбенты, стабилизаторы и пр. Многие из них применяются также и для удаления нефтезагрязнений из почвы.

К недостаткам применения биопрепаратов можно отнести их невысокую эффективность при ликвидации крупных разливов нефти и нефтепродуктов, при которых толщина пленки на водной поверхности составляет более 1 мм, а также необходимость внесения значительного количества питательных веществ, стимулирующих активность микробиоты при очистке больших объемов нефтезагрязненных вод [Башкин и др., 2010].

Перспективным направлением очистки водных поверхностей и промышленных сточных вод от нефти и нефтепродуктов является использование биосорбентов, т.е. носителей с иммобилизованными на его поверхности микроорганизмами. Носитель защищает клетки от прямого воздействия токсичных веществ и неблагоприятных внешних факторов (температура, кислотность, концентрация электролитов), что позволяет иммобилизованным УОМ в течение длительного времени сохранять жизнеспособность и метаболическую активность [Wang et al., 2012; Martins et al., 2013; Žur et al., 2016]. Кроме того, благодаря иммобилизации собирается значительное количество биомассы и предотвращается ее вынос при поступлении большого объема воды в очистные сооружения. Актуальным является разработка биосорбентов, обладающих способностью к повышенной концентрации растворенных и эмульгированных углеводородов в твердой фазе. Дальнейшая деструкция локализованных загрязнителей нефтеокисляющей микробиотой, иммобилизованной на носителе, обеспечивает эффект саморегенерации сорбента. Многочисленные исследования и полученные по их результатам патенты свидетельствуют, что иммобилизация УОМ способствует повышению эффективности процессов деструкции нефти и нефтепродуктов при очистке загрязненных акваторий, а также нефтесодержащих сточных вод [Морозов и др., 2011, 2017; Сваровская, Алтунина, 2011; Ковальчук, 2013; Артюх и др., 2014; Галкина и др., 2014; Дедов и др., 2014; Белик, Злобина, 2016; Белик, 2017; Сулименко и др., 2017].

Предлагается применять для очистки водной среды потенциал микробно-растительных взаимодействий. В работах [Воскобойников, Пуговкин, 2012; Семенов и др., 2014, 2017; Пуговкин, 2017] установлено, что бактериоценозы фукусовых водорослей и эпифитных углеводородоокисляющих бактерий *Pseudomonas fluorescens*, *P. guinea*, *Ochrobactrum anthropi*, *Rhodococcus fascians* способны к утилизации нефтяных углеводородов, успешно выдерживают их высокие концентрации в водной среде и могут вносить весомый вклад в процессы деструкции нефтяных загрязнений в прибрежных морских акваториях полярных и умеренных широт. Предложен способ очистки морской воды от нефти и нефтепродуктов с использованием симбиоза водорослей (например, рр. *Fucus*, *Laminaria*, *Phyllariella*) и УОМ, в котором используют фильтр, представляющий

собой систему соединенных между собой синтетических канатов, засаженных водорослями и заселенных нефтеокисляющими микроорганизмами [Нетрусов и др., 2011]. Описана схема санитарной водорослевой плантации, успешная апробация которой прошла в Баренцевом и Белом морях. Основой плантации является симбиотическая ассоциация бурых водорослей *Fucus vesiculosus*, *Saccharina latissima* и углеводородокисляющих бактерий [Воскобойников и др., 2009, 2017].

Каждый из рассмотренных методов очистки водной среды от нефтяных углеводородов имеет свои достоинства и недостатки. Выбор способа зависит от конкретного загрязнения, его масштаба и специфики, а также экологической и экономической целесообразности. Но учитывая то, что, ни один из них не может обеспечить полного удаления поллютанта, наиболее перспективным представляется комплексное использование нескольких методов, которое позволит максимально снизить ущерб окружающей среде.

Главные последствия контаминации нефтью водной среды – это образование пленки на воде, ухудшающей газообмен в поверхностных слоях, препятствующей проникновению света, и, как следствие, фотосинтезу, а также оседание тяжелых фракций на дно. Загрязнение углеводородами приводит к ухудшению физических и органолептических свойств воды и вызывает нарушения видовой и трофической структур водных экосистем. Попав в водную среду, нефть распределяется по ее профилю и оказывает влияние на все группы организмов, обитающих как в поверхностном слое, так и в толще и в донных осадках. Особенно сильно негативное влияние разливов в прибрежной зоне и на берегу. Большинство представителей фауны особо чувствительны к действию нефти на ранних стадиях развития. Последствия загрязнений для отдельных видов зависят от численности и скорости воспроизводства их популяций. Наиболее подвержены поражению птицы и млекопитающие. В целом, вредное действие нефти на водных обитателей определяется не столько интоксикацией организмов, сколько их прямым физическим контактом с загрязнителем на поверхности водоемов и на берегах, а также с нарушением местообитаний и кормовой базы.

Очистка водных объектов является одной из самых сложных и трудоемких задач при ликвидации последствий загрязнения нефтью и нефтепродуктами, что связано с динамичностью водной среды и сложностью процессов трансформации углеводородов в ней. Большинство применяемых на практике технологий механической и физико-химической очистки воды от нефти и нефтепродуктов многостадийны, трудоемки, связаны с большими материальными затратами и не обеспечивают полного удаления загрязнителя с поверхности, не говоря уже об углеводородах, растворенных или эмульгированных в воде. На сегодняшний день большое внимание привлекают биологические методы очистки водных объектов от нефти и нефтепродуктов, преимуществами которых являются эффективность, экономичность, экологическая безопасность и отсутствие вторичных загрязнений. Ведущая роль в процессе очистки воды принадлежит микроорганизмам, т.к. только они способны разлагать нефть и ее производные до более простых и безопасных продуктов.

Работа выполнена в рамках государственного задания УФИЦ РАН (№ 075-00326-19-00) по теме № АААА-А18-118022190100-9 на базе УИБ УФИЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Ю., Беднаржевский С.С., Забелин В.А., Комкова А.В., Пушкарев Н.С., Рассадкин Ю.Н., Шевченко Н.Г., Шестопалов А.М. Препарат для очистки почвы и воды от нефти и нефтепродуктов // Патент РФ № 2337069. Заявл. 02.04.2007. Оpubл. 27.10.2008. Бюл. № 30.
2. Артюх Е.А., Мазур А.С., Украинцева Т.В., Костюк Л.В. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти // Известия СПбГТИ(ТУ). 2014. № 26. С. 58–66.
3. Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Аварийные разливы углеводородов в водную среду: проблемы и пути их решения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 11. С. 4–7.
4. Белик Е.С., Злобина К.А. Исследование возможности использования отходов производства в качестве биосорбента // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 3. С. 62–76.
5. Белик Е.С. Оценка эффективности применения биосорбента в технологии биологической очистки воды и почвы от нефтепродуктов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 4. С. 104–114.
6. Бойко Ю.Н., Агошков А.И., Гульков А.Н., Соломенник С.Ф., Гулькова С.Г., Майсс Н.А. Природные сорбенты, используемые для очистки вод от нефти и продуктов ее переработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 63. С. 12–17.
7. Борзенков И.А., Милехина Е.И., Беляев С.С., Иванов М.В. Консорциум микроорганизмов *Rhodococcus maris*, *Rhodococcus* sp., *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas stutzeri*, *Candida* sp., используемый для очистки почвенных и солоноватоводных экосистем от загрязнений нефтепродуктами // Патент РФ № 2023686. Заявл. 13.04.1992. Оpubл. 30.11.1994.
8. Бурлака С.Д., Бруяка М.Р. Использование природных и искусственных сорбентов для очистки нефтесодержащих сточных вод // Научные труды КубГТУ. 2017. № 7. С. 71–77.
9. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4. № 1. С. 217–229.
10. Воробьев Д.С. Влияние нефти и нефтепродуктов на макрозообентос // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 3. С. 42–45.
11. Воробьев Д.С. Биологические основы очистки донных отложений водных объектов от нефти и нефтепродуктов: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук: 03.02.08 / Воробьев Данил Сергеевич. Томск, 2013. 46 с.
12. Воскобойников Г.М., Коробков В.А., Макаров М.В. Способ очистки морских прибрежных вод от пленочных и диспергированных в поверхностном слое воды нефтепродуктов // Патент РФ № 2375315. Заявл. 21.02.2007. Оpubл. 10.12.2009. Бюл. № 34.
13. Воскобойников Г.М., Пуговкин Д.В. О возможной роли *Fucus vesiculosus* в очистке прибрежных акваторий от нефтяного загрязнения // Вестник МГТУ. 2012. Т. 15. № 4. С. 716–721.
14. Воскобойников Г.М., Ильинский В.В., Лопушанская Е.М., Макаров М.В., Пуговкин Д.В., Рыжик И.В., Ляймер А., Йенсен Дж.Б. Санитарная водорослевая плантация для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике // Вопросы современной альгологии. 2017. № 3 (15). URL: <http://algology.ru/1184>

15. Галинуров И.Р., Сафаров А.М., Островская Ю.В., Смирнова Т.П., Хатмуллина Р.М., Сафарова В.И. Оценка отдалённых последствий нефтяного загрязнения паводково-пойменных комплексов малых рек // Нефтегазовое дело. 2011. № 2. С. 152–170.
16. Галкина Н.А., Галкин Е.А., Катаева И.В., Шафран В.Н., Назаренко О.А., Вяткин К.А., Мальцева М.В., Ковальчук Е.А., Кузнецова Т.А. Биосорбент для ликвидации нефти с поверхности водоемов // Патент РФ № 2529771. Заявл. 19.04.2013. Оpubл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
17. Гесс Т.А., Пименова А.С., Дудик Е.В. Модификация нефтяных растительных сорбентов // Материалы XVII международной научно-практической конференции «Химия и химическая технология в XXI веке». Томск: ТПУ, 2016. С. 461–462.
18. Говорушко С.М. Экологические последствия добычи нефти и газа со дна моря // Экология промышленного производства. 2011. № 3. С. 27–32.
19. Гоголева О.А., Немцева Н.В. Углекислородфиксирующие микроорганизмы природных экосистем // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2012. № 2. С. 1–7.
20. Григорьев А.Ю., Книжников А.Ю., Пахорукова К.А. Люди, нефть, птицы. Обзор мирового опыта спасения птиц при нефтяном загрязнении. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 57 с.
21. Гудимов А.В. Способ очистки прибрежной зоны морей от комплексного загрязнения с использованием двустворчатых моллюсков // Патент РФ № 2494978. Заявл. 13.06.2012. Оpubл. 10.10.2013. Бюл. № 28.
22. Гудимов А.В. Способ биологической очистки литоральной зоны морей от нефтепродуктов // Патент РФ № 2505489. Заявл. 13.08.2012. Оpubл. 27.01.2014. Бюл. № 3.
23. Гуславский А.И., Канарская З.А. Перспективные технологии очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 20. С. 191–199.
24. Двадненко М.В., Привалова Н.М. Методы очистки вод от загрязнений нефтью и нефтепродуктами // Международный журнал экспериментального образования. 2017. № 3–1. С. 90–91.
25. Дедов А.Г., Иванова Е.А., Белоусова Е.Е., Кашеева П.Б., Карпова Е.Ю., Идиатулов Р.К., Кирпичников М.П., Лобакова Е.С., Васильева С.Г., Соловченко А.Е. Биоразлагаемый композиционный сорбент нефти и нефтепродуктов // Патент РФ № 2528863. Заявл. 03.06.2013. Оpubл. 20.09.2014. Бюл. № 26.
26. Демьянова Н.А., Сентюрова М.В., Васильев С.И., Надежкин И.В. Удаление тонких нефтяных пленок с водной поверхности // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 10. С. 46–49.
27. Денисова Е.С. Анализ устойчивости и аккумуляционной способности высших водных растений в условиях экологического загрязнения рек нефтепродуктами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8–4. С. 553–556.
28. Долгополова В.Л., Патрушева О.В. Способы очистки морских акваторий от нефтяных загрязнений // Молодой ученый. 2016. № 29. С. 229–234.
29. Дубина В.А., Катин И.О. Нефтяное загрязнение Дальневосточного морского заповедника по спутниковым данным и натурным наблюдениям // Вестник ДВО РАН. 2012. № 6. С. 94–100.
30. Дягилец Е.Ю., Книжников А.Ю., Мнацеканов Р.А., Пегова О.В. Люди, нефть, птицы. Рекомендации для практических мероприятий. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 58 с.

31. Заводская О.Ф., Копнина А.Ю. Фиторемедиация воды, загрязненной различными компонентами, с использованием урути мутовчатой (*Myriophyllum verticillatum*) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 3. С. 40–44.
32. Ихсанов В.Б., Ихсанова Н.А. Способ обработки призабойной зоны нефтескважины // Патент РФ № 2156353. Заявл. 02.03.2000. Опубл. 20.09.2000. Бюл. № 26.
33. Каниева Н.А., Фёдорова Н.Н. Морфофункциональные изменения карповых рыб под воздействием нефти // Вестник АГТУ. 2014. № 1. С. 69–73.
34. Караев С., Шихалиев К. Экологические проблемы транспортировки нефти и нефтепродуктов и новые методы очистки водной поверхности от нефти и нефтепродуктов. Hannover: EAEN, 2014. 44 стр.
35. Карпович Л.Л., Масленникова В.В. Аварийное загрязнение поверхностных вод Российской Федерации // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2013. Т. 19(1). С. 69–72.
36. Кахраманлы Ю.Н. Несовместимые полимерные смеси и композиционные материалы на их основе. Баку: «ЭЛМ», 2013. 152 с.
37. Кириевская Д.В. Зообентос Чукотского моря: современное состояние и тенденции антропогенной нагрузки // Принципы экологии. 2017. № 2. С. 15–27.
38. Клишин А.Ю., Каниева Н.А., Баджаева О.В., Фёдорова Н.Н. Моллюски как индикаторы нефтяного загрязнения // Материалы IV международной конференции «Проблемы патологии, иммунитета и охраны здоровья рыб и других гидробионтов». Ярославль: Филигрань, 2015. С. 529–533.
39. Клишин А.Ю., Каниева Н.А., Баджаева О.В., Фёдорова Н.Н. Нарушения органов и тканей моллюсков рода *Unio* под воздействием нефти // Труды ВНИРО. 2016. Т. 162. С. 82–86.
40. Ковальчук Е.А. Биосорбент для ликвидации нефти с поверхности водоемов // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3–6. С. 1817–1819.
41. Коновалов А.С. Использование активированных цеолитов для обезвреживания экотоксикантов: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Коновалов Александр Сергеевич. Иркутск, 2016. 116 с.
42. Кручинин Н.А., Глухарев И.И., Долинина О.В. Фитодетоксикация промышленных стоков с помощью эйхорнии // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI-го века. 2012. № 5. С. 33–38.
43. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Нефтяные компоненты в устьевой области р. Дон и в Азовском море (результаты многолетних исследований) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 49–59.
44. Кульков М.Г., Артамонов В.Ю., Коржов Ю.В., Углев В.В. Индивидуальные органические соединения нефти как индикаторы техногенного нефтяного загрязнения водной среды // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 1. С. 196–200.
45. Ларин А.А., Павленко Л.Ф., Корпакова И.Г. Накопление загрязняющих веществ в моллюсках из юго-восточного района Азовского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 1. С. 45–48.
46. Леонов А.В., Пищальник В.М., Чичерина О.В. Биогидрохимия морской среды и особенности трансформации биогенных веществ и нефтяных углеводородов на юго-восточном шельфе Сахалина // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 164–187.
47. Леонов А.В., Семяняк Л.В., Чичерина О.В. Углеводороды в Белом море: их поступление и трансформация в морской среде в разных районах // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 1. С. 38–62.

48. Лобанова В.Д., Угланова В.З. Боны – инженерные решения по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов // Теория и практика современной науки. 2016. № 5. URL: [http://modern-j.ru/domains_data/files/11/Lobanova%20V.%20\(Osnovnoy%20razdel\).pdf](http://modern-j.ru/domains_data/files/11/Lobanova%20V.%20(Osnovnoy%20razdel).pdf)
49. Логинов О.Н., Султанов И.М., Четвериков С.П., Давлетшин Т.К., Коршунова Т.Ю., Столярова Е.А., Мухаматдырова С.Р., Кобызева Н.В. Консорциум штаммов микроорганизмов *Acinetobacter* sp. и *Ochrobactrum* sp., используемый для очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов // Патент РФ № 2553540. Заявл. 29.11.2012. Оpubл. 20.06.2015. Бюл. № 17.
50. Лозовой Д.В. Влияние нефтяных углеводородов на байкальских гидробионтов в естественных и лабораторных условиях // Георесурсы. 2012. Т. 43. № 1. С. 53–58.
51. Лыонг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., Пунтус И.Ф., Понаморева О.Н. Бактерии-нефтедеструкторы рода *Rhodococcus* – потенциальные продуценты биосурфактантов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. № 16. С. 50–60.
52. Лыонг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., Филонов А.Е., Понаморева О.Н. Структура и физико-химические свойства гликолипидных биосурфактантов, продуцируемых бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 2. С. 72–79.
53. Моисеенко Т., Шалабодов А., Гашев С. Качество сибирских вод // Наука в России. 2012. № 4. С. 13–19.
54. Морозов Н.В., Хуснетдинова Л.З., Жукова О.В. Использование иммобилизованных на органическом сорбенте нефтеокисляющих микроорганизмов для очистки воды от нефти // Фундаментальные исследования. 2011. № 12. С. 576–579.
55. Морозов Н.В. Управляемая биоремедиация нефтезагрязнений в природных водах органическими сорбентами разнообразного происхождения // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 11. С. 137–141.
56. Московченко Д.В., Убайдуллаев А.А. Влияние разливов нефти на загрязнение поверхностных вод Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Вестник Тюменского государственного университета. Науки о земле. 2014. № 4. С. 5–16.
57. Мурыгина В.П., Войшвилло Н.Е., Калюжный С.В. Биопрепарат «Родер» для очистки почв, почвогрунтов, пресных и минерализованных вод от нефти и нефтепродуктов // Патент РФ № 2174496. Заявл. 31.05.1999. Оpubл. 10.10.2001. Бюл. № 28.
58. Мязин В.В. Оценка возможности применения минерального сорбента для очистки нефтезагрязненных морских вод // Материалы научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017». Севастополь: Изд-во СГУ, 2017. С. 942–944.
59. Назаров В.Д., Назаров М.В. Влияние нефтедобычи на водные объекты // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 2. С. 5–9.
60. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013. 432 с.
61. Немировская И.А. Изменчивость концентраций и состава углеводородов во фронтальных зонах Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 497–507.
62. Немировская И.А., Трубкин А.П., Травкина А.В. Углеводороды в водах и донных осадках Белого моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 3(105). С. 77–89.
63. Немировская И.А., Реджепова З.Ю., Трубкин И.П. Трансформация углеводородов в зоне река – море в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 2(108). С. 64–78.
64. Нетрусов А.М., Семенов А.И., Семенова Е.В., Шеляков О.В., Иванов М.Н., Кирпичников М.П. Способ очистки воды от нефти и нефтепродуктов // Патент РФ № 2412913. Заявл. 25.12.2008. Оpubл. 27.02.2011. Бюл. № 6.

65. Пайдулова Ю.А., Турковская О.В. Фиторемедиационный потенциал некоторых высших водных растений водоёмов Саратовской области // Поволжский экологический журнал. 2015. № 3. С. 294–300.
66. Паничева Л.П., Моисеенко Т.И., Кремлева Т.И., Волкова С.С. Биохимическая трансформация нефтяных углеводородов в водах Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 12. С. 38–48.
67. Патин С.А. Нефтяные разливы и их воздействия на морскую среду и биоресурсы. М.: Изд-во ВНИРО, 2008. 508 с.
68. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. В 2-х т. Т. 1: Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. М.: Изд-во ВНИРО, 2017. 326 с.
69. Петриков К.В., Ветрова А.А., Иванова А.А., Делеган Я.А., Гафаров А.Б., Соколов С.Л. Характеристика продуцентов биоПАВ, выделенных из поверхностных вод и седиментов Балтийского моря // Материалы 4-й Пущинской конференции «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов». М.: ИД «Вода: химия и экология», 2017. С. 84–86.
70. Пирог Т.П., Софилканич А.П., Гриценко Н.А. Деструкция нефтяных загрязнений в присутствии поверхностно-активных веществ *Acinetobacter calcoaceticus* IMB B-7241, *Rhodococcus erythropolis* IMB AC-5017 и *Nocardia vaccinii* IMB B-7405 // Biotechnology. Theory and Practice / Биотехнология. Теория и практика. 2015. № 2. С. 42–50.
71. Пирог Т.П., Панасюк Е.В., Антонюк Н.А. Влияние микробных ПАВ *Nocardia vaccini* IMB B-7405 на деструкцию нефти в воде // Химия и технология воды. 2016. Т. 38. № 5(253). С. 542–552.
72. Последствия разливов нефти для морской экологии. IPIECA-IOPG, 2015. URL: http://www.oilspillresponseproject.org/wp-content/uploads/2017/02/Marine-ecology_RU.pdf
73. Привалова Н.М., Двадненко М.В., Некрасова А.А., Попова О.С., Привалов Д.М. Исследование методов очистки вод от загрязнений нефтью и нефтепродуктами // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 113(09). URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/25.pdf>
74. Привалова Н.М., Двадненко М.В., Некрасова А.А., Попова О.С., Привалов Д.М. Исследование сорбционных свойств фильтрующих материалов // Научный журнал КубГАУ. 2017. № 126(02). URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/20.pdf>
75. Пуговкин Д.В. Эпифитные бактериоценозы *Fucus vesiculosus* L. Баренцева моря и их роль в деградации нефтяных загрязнений: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 25.00.28 / Пуговкин Дмитрий Витальевич. Мурманск, 2017. 27 с.
76. Пыстина Н.Б. Биосорбент для очистки воды от углеводородных загрязнений и способ его получения Н.Б. Пыстина, Е.Л. Листов, Н.С. Хохлачев, В.Н. Лужков // Патент РФ № 2656146. Заявл. 20.10.2017. Оpubл. 31.05.2018. Бюл. № 16.
77. Сваровская Л.И., Алтунина Л.К. Биопрепарат для очистки воды от нефти и нефтепродуктов // Вода: химия и экология. 2011. № 8. С. 55–60.
78. Семенов А.М., Федоренко В.Н., Семенова Е.В. Микроорганизмы на поверхности морских макрофитов в северных морях России и их возможное практическое использование // Биосфера. 2014. Т. 6. № 1. С. 60–76.
79. Семенов А.М., Оленин А.В., Хохлачев Н.С. Окисление нефти в морской среде бактериями – эпифитами бурых водорослей // Вести газовой науки. 2017. № 5(33). С. 135–139.
80. Степанова А.Ю., Соловьева А.И., Гладков Е.А. Влияние нефти как неблагоприятного фактора на растения и фиторемедиация нефтезагрязненных территорий // Вестник

- биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. 2017. Т. 13. № 3. С. 51–57.
81. Сулименко Л.П., Кошкина Л.Б., Маслобоев В.А. Практические аспекты использования сорбентов для санации локальных нефтезагрязненных северных территорий // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 1. С. 116–123.
 82. Технический информационный документ «Последствия загрязнения нефтью для окружающей среды». ИТОПФ, 2011. № 13. URL: https://www.itopf.org/uploads/translated/TIP_13_2011_RU_FINAL.PDF
 83. Тимергазина И.Ф., Переходова Л.С. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/7/16_2012.pdf
 84. Умербаева Р.И., Попова Н.В. Содержание углеводов в органах и тканях рыб, обитающих на лицензионном участке ООО «Каспийская нефтяная компания» // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 12. С. 55–58.
 85. Холмогорова Н.В. Трансформация фауны макрозообентоса малых рек Удмуртии под воздействием факторов нефтедобычи: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Холмогорова Надежда Владимировна. Казань, 2009. 24 с.
 86. Шубаков А.А., Шарапова И.Э., Михайлова Е.А. Использование микроводорослей для биоремедиации водных сред // Сборник статей по материалам XIV международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». Новосибирск: СибАК, 2012. URL: <https://sibac.info/conf/tech/xiv/29353>
 87. Янкевский А.В., Ганченко Д.Д., Чернева Е.В., Щерба В.А. Экологические проблемы добычи нефти и газа на шельфе Мирового океана // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/45TVN617.pdf>
 88. Allam A., Tawfik A., El-Saadi A., Negm A. Potentials of using duckweed (*Lemna gibba*) for treatment of drainage water for reuse in irrigation purposes // Desalin. Water Treat. 2016. V. 57. No 1. P. 459–467.
 89. Alpha N.E., Barminas J.T., Osemeahon S.A. Modification, characterization and use of *Imperata cylindrical* (Toofa) fibre as oil sorbent // Chem. Sci. Int. J. 2017. V. 21. No 3. Article no. CSIJ.39420. URL: DOI: [10.9734/CSJI/2017/39420](https://doi.org/10.9734/CSJI/2017/39420)
 90. Al-Saad H.T., Al-Ali B.S., Al-Anber L.J., Al-Khion D.D., Hantoush A.A., Saleh S.M., Alaial A.H. Total petroleum hydrocarbon in selected fish of Shatt Al-Arab river, Iraq // Int. J. Mar. Sci. 2017. V. 7. No 1. DOI: [10.5376/ijms.2017.07.0001](https://doi.org/10.5376/ijms.2017.07.0001)
 91. Ángeles M.T., Refugio R.V. *In situ* biosurfactant production and hydrocarbon removal by *Pseudomonas putida* CB-100 in bioaugmented and biostimulated oil-contaminated soil // Braz. J. Microbiol. 2013. V. 44. No 2. P. 595–605.
 92. Asadpour R., Harith Z.Z., Sapari N. Application of sorbent materials in oil spill management: a review // Caspian J. Appl. Sci. Res. 2013. V. 2. No 2. P. 46–58.
 93. Ateia M., Yoshimura C., Nasr M. *In-situ* biological water treatment technologies for environmental remediation: a review // J. Bioremed. Biodegrad. 2016. V. 7. No 3: 348. DOI: [10.4172/2155-6199.1000348](https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000348)
 94. Barakat Kh.M., Hassan S.W.M., Darwesh O.M. Biosurfactant production by haloalkaliphilic *Bacillus* strains isolated from Red Sea, Egypt // Egyp. J. Aquatic Res. 2017. V. 43. No 3. P. 205–211.
 95. Bazargan A., Tan J., Hui Ch.W., McKay G. Utilization of rice husks for the production of oil sorbent materials // Cellulose. 2014. V. 21. No 3. P. 1679–1688.

96. Bezza F.A., Beukes M., Chirwa E.M.N. Application of biosurfactant produced by *Ochrobactrum intermedium* CN3 for enhancing petroleum sludge bioremediation // Proc. Biochem. 2015. V. 50. No 11. P. 1911–1922.
97. Bezza F.A., Chirwa E.M.N. Pyrene biodegradation enhancement potential of lipopeptide biosurfactant produced by *Paenibacillus dendritiformis* CN5 strain // J. Hazard. Mater. 2017. V. 321. P. 218–227.
98. Biosurfactants. Research trends and applications / Mulligan C.N., Sharma S.K., Mudhoo A. (Eds.). CRC Press, 2015a. 346 p.
99. Biosurfactants: Production and utilization – processes, technologies and economics / Kosaric N., Sukan F.V. (Eds.). CRC Press, 2015b. 389 p.
100. Brakstad O.G., Throne-Holst M., Netzer R., Stoeckel D.M., Atlas R.M. Microbial communities related to biodegradation of dispersed Macondo oil at low seawater temperature with Norwegian coastal seawater // Microbiol. Biotechnol. 2015. V. 8. No 6. P. 989–998.
101. Carroll J.L., Vikebo F., Howell D., Broch O.J., Nepstad R., Augustine S., Skeie G.M., Bas R., Juselius J. Assessing impacts of simulated oil spills on the Northeast Arctic cod fishery // Mar. Poll. Bull. 2018. V. 126. P. 63–73.
102. Castège I., Milon E., Pautrizel F. Response of benthic macrofauna to an oil pollution: Lessons from the “Prestige” oil spill on the rocky shore of Guéthary (south of the bay of Biscay, France) // Deep Sea research. Part II: Topical studies in oceanography. 2014. V. 106. P. 192–197.
103. Chai W., Liu X., Zhang X., Li B., Yin T., Zou J. Preparation and characterization of polypropylene fiber-grafted polybutylmethacrylate as oil sorbent // Desalin. Water Treat. 2016. V. 57. No 39. P. 18560–18571.
104. Ferrando A., Gonzalez E., Franco M., Commendatore M., Nievas M., Milton C., Stora G., Gilbert F., Esteves J.L., Cuny Ph. Oil spill effects on macrofaunal communities and bioturbation of pristine marine sediments (Caleta Valdés, Patagonia, Argentina): experimental evidence of low resistance capacities of benthic systems without history of pollution // Environ. Sci. Poll. Res. 2015. V. 22. No 20. P. 15294–15306.
105. Fodrie F.J., Able K.W., Galvez F., Heck K.L., Jensen Jr.O.P., López-Duarte P.C., Martin Ch.W., Turner R.E., Whitehead A. Integrating organismal and population responses of estuarine fishes in Macondo spill research // BioScience. 2014. V. 4. No 9. P. 778–788.
106. Fox C.H., O'Hara P.D., Bertazzon S., Morgan K., Underwood F.E., Paquet P.C. A preliminary spatial assessment of risk: Marine birds and chronic oil pollution on Canada's Pacific coast // Sci. Total Environ. 2016. V. 573. P. 799–809.
107. Freitas B.G., Brito J.G.M., Brasileiro P.P.F., Rufino R.D., Luna J.M., Santos V.A., Sarubbo L.A. Formulation of a commercial biosurfactant for application as a dispersant of petroleum and by-products spilled in oceans // Front. Microbiol. 2016. V. 7: 1646. DOI: [10.3389/fmicb.2016.01646](https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01646)
108. Fulmer P.A., Hamdan L.J. Effects of COREXIT EC9500A on bacterial communities influenced by the Deepwater Horizon oil spill. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2010. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFMOS33B1475F>
109. Gagnon V., Chazarenc F., Kõiv M., Brisson J. Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland // Water Res. 2012. V. 46. No 16. P. 5305–5315.
110. Haney J.Ch., Geiger H.J., Short J.W. Bird mortality from the Deepwater Horizon oil spill. I. Exposure probability in the offshore Gulf of Mexico // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2014. V. 513. P. 225–237. URL: DOI: [10.3354/meps10991](https://doi.org/10.3354/meps10991)
111. Harvey H.R., Taylor K.A., Pie H.V., Mitchelmore C.L. Polycyclic aromatic and aliphatic hydrocarbons in Chukchi Sea biota and sediments and their toxicological response in the

- Arctic cod, *Boreogadus saida* // Deep Sea Research. Part II: Topical studies in oceanography. 2014. V. 102. P. 32–55. DOI: [10.1016/j.dsr2.2013.07.013](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.07.013)
112. Hazen T.C., Prince R.C., Mahmoudi N. Marine oil biodegradation // Environ. Sci. Technol. 2016. V. 50. P. 2121–2129.
113. Hing L.S., Ford T., Finch P., Crane M., Morrith D. Laboratory stimulation of oil-spill effects on marine phytoplankton // Aquatic toxicol. 2011. V. 103. No 1–2. P. 32–37. DOI: [10.1016/j.aquatox.2011.02.014](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.02.014)
114. Hoang A.T., Pham V.V., Nguyen D.N. A report of oil spill recovery technologies // Int. J. Appl. Engin. Res. 2018. V. 13. No 7. P. 4915–4928.
115. Huang Y.J. Jiang Z.B., Zeng J.N., Chen Q.Z., Zhao Y.Q., Liao Y.B., Shou L., Xu X.Q. The chronic effects of oil pollution on marine phytoplankton in a subtropical bay, China // Environ. Monit. Assess. 2011. V. 176. No 1–4. P. 517–530. DOI: [10.1007/s10661-010-1601-6](https://doi.org/10.1007/s10661-010-1601-6)
116. Idris J., Eyu G.D., Mansor A.M., Ahmad Z., Chukwuekezie C.S. A preliminary study of biodegradable waste as sorbent material for oil-spill cleanup // Sci. World J. 2014. ID 638687. URL: DOI: [10.1155/2014/638687](https://doi.org/10.1155/2014/638687)
117. Jiang Z., Huang Y., Xu X., Liao Y., Shou L., Liu J., Chen Q., Zeng J. Advance in the toxic effects of petroleum water accommodated fraction on marine plankton // Acta Ecol. Sin. 2010. V. 30. No 1. P. 8–15. DOI: [10.1016/j.chnaes.2009.12.002](https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.12.002)
118. Joshi P., Shekhawat D. Screening and isolation of biosurfactant producing bacteria from petroleum contaminated soil // Euro. J. Exp. Bio. 2014. V. 4. No 4. P. 164–169.
119. Kapadia S.G., Yagnik B.N. Current trend and potential for microbial biosurfactants // Asian J. Exp. Biol. Sci. 2013. V. 4. No 1. P. 1–8.
120. Kleindienst S., Seidel M., Ziervogel K., Grim Sh., Loftis K., Harrison S., Malkin S.Y., Perkins M.J., Field J., Sogin M.L., Dittmar T., Passow U., Medeiros P.M., Joye S.B. Chemical dispersants can suppress the activity of natural oil-degrading microorganisms // Proceed. Nation. Acad. Sci. 2015. V. 112. No 48. P. 14900–14905.
121. Langangen O., Olsen E., Stige L.C., Ohlberger J., Yaragina N.A., Vikebo F.B., Bogstad B., Stenseth N.C., Hjermann D.O. The effects of oil spills on marine fish: Implications of spatial variation in natural mortality // Mar. Poll. Bull. 2017. V. 119. No 1. P. 102–109.
122. Lee L.-H., Lin H.-J. Effects of an oil spill on benthic community production and respiration on subtropical intertidal sandflats // Mar. Poll. Bull. 2013. V. 73. No 1. P. 291–299.
123. Li S., Wu X., Cui L., Zhang Y., Luo X., Zhang Y., Dai Zh. Utilization of modification polyester non-woven as an affordable sorbent for oil removal // Desalin. Water Treat. 2015. V. 54. No 11. P. 3054–3060.
124. Mapelli F., Scoma A., Michoud G., Aulenta F., Boon N., Borin S., Kalogerakis N., Daffonchio D. Biotechnologies for marine oil spill cleanup: indissoluble ties with microorganisms // Trends Biotechnol. 2017. V. 35. No 9. P. 860–870.
125. Marchant R., Banat I.M. Biosurfactants: a sustainable replacement for chemical surfactants? // Biotechnol. Lett. 2012. V. 34. No 9. P. 1597–1605.
126. Martins S.C.S., Martins C.M., Fiúza L.M.C.C., Santaella S.T. Immobilization of microbial cells: A promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater // African J. Biotechnol. 2013. V. 12. No 28. P. 4412–4418.
127. Murawski S.A., Hogarth W.T., Peebles G.M., Barbeiri L. Prevalence of external skin lesions and polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in Gulf of Mexico fishes, post Deepwater Horizon // Trans. Am. Fish. Soc. 2014. V. 143. No 4. P. 1084–1097.
128. Onwuka J.Ch., Agbaji E.B., Ajibola V.O., Okibe F.G. Kinetic studies of surface modification of lignocellulosic *Delonix regia* pods as sorbent for crude oil spill in water // J. Appl. Res. Technol. 2016. V. 14. No 6. P. 415–424.

129. Oribayo O., Pan Q., Feng X., Rempel G.L. Hydrophobic surface modification of FMSS and its application as effective sorbents for oil spill clean-ups and recovery // *AIChE journal*. 2017. V. 63. No 9. URL: DOI: [10.1002/aic.15767](https://doi.org/10.1002/aic.15767)
130. Ozhan K., Parsons M.L., Bargu S. How were phytoplankton affected by the Deepwater Horizon oil spill? // *BioScience*. 2014. V. 64. No 9. P. 829–836.
131. Pirog T.P., Konon A.D., Savenko I.V. Microbial surfactants in environmental technologies // *Biotechnol. Acta*. 2015. V. 8. No 4. P. 21–39.
132. Romero-Lopez J., Lopez-Rodas V., Costas E. Estimating the capability of microalgae to physiological acclimatization and genetic adaptation to petroleum and diesel oil contamination // *Aquatic toxicol.* 2012. V. 124–125. P. 227–237. DOI: [10.1016/j.aquatox.2012.08.001](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.08.001)
133. Santos D.K.F., Rufino R.D., Luna J.M., Santos V.A., Salgueiro A.A., Sarubbo L.A. Synthesis and evaluation of biosurfactant produced by *Candida lipolytica* using animal fat and corn steep liquor // *J. Petrol. Sci. Engin.* 2013. V. 105. P. 43–50.
134. Santos D.K.F., Resende A.H.M., de Almeida D.G., de Cássia R., Soares da Silva F., Rufino R.D., Luna J.M., Banat I.M., Sarubbo L.A. *Candida lipolytica* UCP0988 biosurfactant: potential as a bioremediation agent and in formulating a commercial related product // *Front Microbiol.* 2017. V. 8: 767. DOI: [10.3389/fmicb.2017.00767](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00767)
135. Sarubbo L.A., Rocha Júnior R.B., Luna J.M., Rufino R.D., Santos V.A., Banat I.M. Some aspects of heavy metals contamination remediation and role of biosurfactants // *Chem. Ecol.* 2015. V. 31. P. 707–723.
136. Shah N., Nikam R., Gaikwad S., Sapre V., Kaur J. Biosurfactant: types, detection methods, importance and applications // *Indian J. Microbiol. Res.* 2016. V. 3. No 1. P. 5–10.
137. Sharma R., Oberoi H.S. Biosurfactant-aided bioprocessing: industrial applications and environmental impact // In: *Recent advances in applied microbiology*. Shukla P. (Ed.). Springer: Singapore, 2017. P. 55–88.
138. Teli M.D., Valia S.P. Application of modified coir fiber as eco-friendly oil sorbent // *J. Fashion Technol. Textile Engin.* 2013. V. 1. No 1. DOI: [10.4172/2329-9568.1000103](https://doi.org/10.4172/2329-9568.1000103)
139. Thibodeaux L.J., Valsaraj K.T., John V.T., Papadopoulos K.D., Pratt L.R., Pesika N.S. Marine oil fate: knowledge gaps, basic research, and development needs; a perspective based on the Deepwater Horizon spill // *Environ. Engin. Sci.* 2011. V. 28. No 2. P. 87–93.
140. Wang Zh.-Y., Xu Y., Wang H.-Y., Zhao J., Gao D.-M., Li F.-M. Biodegradation of crude oil in contaminated soils by free and immobilized microorganisms // *Pedosphere*. 2012. V. 22. No 5. P. 717–725.
141. Xue J., Yu Y., Bai Y., Wang L., Wu Y. Marine oil-degrading microorganisms and biodegradation process of petroleum hydrocarbon in marine environments: a review // *Curr. Microbiol.* 2015. V. 71. No 2. P. 220–228.
142. Žur J., Wojcieszynska D., Guzik U. Metabolic responses of bacterial cells to immobilization: Review // *Molecules*. 2016. V. 21. No 7: 958. DOI: [10.3390/molecules21070958](https://doi.org/10.3390/molecules21070958)