

УДК 631.4; 579.6
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-40-51>

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2021

Разработка биосорбента для ликвидации последствий углеводородных загрязнений на объектах нефтегазового комплекса

Башкин В.Н.*

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142292, Россия,
Московская обл., г. Пушкино,
ул. Институтская, д. 2-1

Лужков В.А.,

Газпром ВНИИГАЗ,
142717, Россия,
Московская обл.,
пос. Развилка,
5537-й Проектируемый
проезд, владение 15

Трубицина О.П.,

Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М. В. Ломоносова,
163002, Россия,
г. Архангельск, набережная
Северной Двины, д. 17

Аннотация

В статье представлены результаты управления экологическими рисками при ликвидации последствий углеводородных (УВ) загрязнений на объектах нефтегазового комплекса (НГК) с применением разработанного биосорбента на основе гидрофобизированного торфа и углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ).

Ключевые слова: нефтепродукты, биосорбенты, биоремедиация, экологические риски, торф, самоочищение почв.

Для цитирования: Башкин В. Н., Лужков В. А., Трубицина О. П. Разработка биосорбента для ликвидации последствий углеводородных загрязнений на объектах нефтегазового комплекса // Проблемы анализа риска. Т. 18. 2021. № 1. С. 40—51, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-40-51>

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Development of Biosorbent to Eliminate the Consequences of Hydrocarbon Pollution at Oil and Gas Facilities

Vladimir N. Bashkin*,

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS,
Institute str., 2-1, Pushchino,
Moscow region, 142292, Russia

Victor A. Luzhkov,

Gazprom VNIIGAZ,
Proektiruemyj proezd 5537,
15, Razvilka, Moscow region,
142717, Russia

Olga P. Trubitsina,

Northern (Arctic) Federal
University,
Embankment of the Northern
Dvina, 17, Arkhangelsk,
163002, Russia

Abstract

The article presents the results of ecological risk management in the elimination of the consequences of hydrocarbon pollution at oil and gas facilities using the developed biosorbent based on hydrophobized peat and hydrocarbon-oxidizing microorganisms.

Keywords: petroleum products, biosorbents, bioremediation, ecological risks, peat, soil self-purification.

For citation: Bashkin V.N., Luzhkov V.A., Trubitsina O.P. Development of biosorbent to eliminate the consequences of hydrocarbon pollution at oil and gas facilities // Issues of Risk Analysis. Vol. 18. 2021. No. 1. P. 40—51, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-40-51>

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Использование сорбентов при обезвреживании нефтесодержащих отходов

2. Лабораторные испытания сорбента

Заключение

Литература

Введение

Подвергая опасности здоровье людей и принося немалые экологические и экономические потери, чрезвычайные ситуации (ЧС) в виде аварий на объектах нефтегазового комплекса и следующих за ними разливов нефтепродуктов (НП) представляют собой значительную опасность. Очевидно, что вопросы предупреждения и ликвидации последствий аварийных разливов являются более чем актуальными.

Управление риском — это разработка и обоснование эффективных программ по реализации решений в области обеспечения безопасности. Основным здесь является процесс оптимального распределения ресурсов для снижения различных видов риска и достижения максимально возможного для данной ситуации уровня безопасности населения и окружающей среды (ОС). Иными словами, управление риском есть целенаправленная деятельность по обеспечению реализации наилучших из возможных способов уменьшения рисков до минимального уровня при данных условиях, основанная на предварительной оценке риска [1].

При анализе проблем управления риском при аварийных разливах управляющие функции можно разделить на две категории: активные и пассивные. Активные мероприятия делят на превентивные, направленные на снижение вероятности ЧС (с помощью автоматизированных средств контроля), и мероприятия по снижению потенциального ущерба (технологии). Пассивные мероприятия направлены исключительно на ликвидацию последствий возможных аварий и могут влиять на ущерб в зависимости от применяемых методов ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов [2]. Среди этих методов распространены технологии биоремедиации.

При этом необходимо учитывать, что в настоящее время разливы нефтепродуктов часто происходят в промышленных агломерациях, где наблюдается повышенная атмотехногенная загрязненность выпадающих как твердых, так и жидких осадков различными загрязняющими веществами (кислотные соединения серы и азота, тяжелые металлы, полициклические соединения, сажа, пыль и др.). Установлено негативное воздействие на микроорганизмы и других загрязняющих веществ (ЗВ), выбрасываемых в атмосферу в процессе промышленного производства, подготовки нефти и газа к транспорту и самой транспортировки [3].

Типичным примером поликомпонентного загрязнения окружающей среды является недавний разлив нефтепродуктов в районе Норильской промышленной агломерации, когда на активность микроорганизмов-деструкторов влияли как высокая концентрация самих НП, так и поступающие с атмосферными осадками другие ЗВ, в частности ТМ, оксиды серы и азота. Это резко увеличило вероятность возникновения экологического риска [4].

Известно, что в районах Крайнего Севера большая часть осадков (твердых и жидких), особенно в прибрежных районах, имеет кислую реакцию, что связано как с упомянутыми выше промышленными причинами, так и с природными процессами. При том что в целом пространственное распределение выпадений с пониженным рН носит локальный характер, доля действующих сильных кислот в атмосферных осадках и снежном покрове эпизодически проявляется в пространстве и во времени при соотношениях разности суммы ионов к сумме анионов Σ^+ / Σ^- от 0,83 до 1,04. При соотношении

Σ^+ / Σ^- в указанных пределах не подвергаются нейтрализации в зимний период 17% осадков, а в теплый период 15% жидких осадков.

Если ранжировать по массе в общей сумме выбросов загрязняющие вещества, то наиболее распространенными ингредиентами атмосферных осадков по основным источникам загрязнения Крайнего Севера являются SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- . Несмотря на тенденции уменьшения общего объема выбросов, в начале XXI в. либо отмечается увеличение доли серных и азотных соединений в атмосферном воздухе (например, города Архангельской агломерации), либо регистрируется относительно стабильный большой объем кислотообразующих выбросов от стационарных источников промышленных центров Вологодской области (Череповец) и Республики Коми (Воркута) [5].

В подавляющем большинстве случаев (88%) нейтрализации осадков не происходит, что указывает на недостаток в их составе кислотных нейтрализаторов [6].

Также распространены и выбросы пыли, тяжелых металлов и других ЗВ в совокупности со специфическими веществами, связанными с особенностями промышленного производства на исследуемой территории. Например, для Крайнего Севера такими веществами являются метилмеркаптан, формальдегид, бенз(а)пирен, сероуглерод. Буферные свойства торфа позволяют устранять влияние этих поллютантов [7, 8].

В статье представлены результаты оценки способа управления экологическими рисками при ликвидации последствий углеводородных (УВ) загрязнений на объектах НГК с применением разработанного биосорбента на основе гидрофобизированного торфа и углеводородокисляющих микроорганизмов.

Целью работы было создание биопрепарата и биосорбента на основе консорциума штаммов УОМ, способных обеспечить очистку объектов окружающей среды (ООС) от УВ-загрязнений с концентрацией до 10% для ликвидации последствий ЧС в виде аварийных разливов НП.

В задачи исследования входили: разработка и получение новых биопрепарата и биосорбента на основе УОМ; апробация разработанных программ применения новых продуктов в качестве способа управления экологическими рисками для

ликвидации последствий ЧС в виде аварийных разливов НП; создание алгоритма для проведения предварительных исследований *in vitro* для их последующего применения *in situ*.

Данное исследование имеет прикладное значение и направлено на одну из важнейших хозяйственно-экологических проблем — ликвидацию последствий ЧС при аварийных разливах в ходе работ по очистке ООС от нефтепродуктов. На основе разработанных консорциумов штаммов УОМ были созданы биопрепарат и биосорбент для очистки ООС от УВ-загрязнений. Разработана технология производства и применения новых биопрепарата и биосорбента. Доказана эффективность управления рисками с применением методов микробной инженерии.

1. Использование сорбентов при обезвреживании нефтесодержащих отходов

Опыт последних десятилетий показал, что ликвидация последствий разливов НП при возникающих авариях на отраслевых объектах является серьезной проблемой. Сорбционные методы ликвидации таких разливов подтвердили свою эффективность, в т. ч. и в мировой практике применения разлитых НП как с водной поверхности, так и с поверхности почв [9].

Процесс сорбции НП протекает в результате возникающей силы притяжения между молекулами нефти и сорбента на границе соприкасающихся фаз. Очевидно, что свойства поверхности и площадь сорбента влияют на количество впитываемого вещества.

Известны порошкообразные гидрофобные материалы, впитывающие нефть с поверхности воды и суши [10]. Этот способ применяется в условиях малой толщины пленки НП. При очистке поверхностей с большим количеством загрязнителя порошковые гидрофобные сорбенты играют роль загустителей. Это приводит к увеличению вязкости суспензии и образованию плотных конгломератов.

Сорбенты на основе торфа

Торф — многокомпонентное природное образование, имеющее в своем составе различные минеральные и органические соединения. По своему химическому составу торф занимает промежуточное

положение между растительным сырьем и твердым топливом. Его относят к группе каустобиолитов¹.

В состав минеральной части торфа в наиболее значимых количествах входят следующие вещества: SiO_2 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O , P_2O_5 , SO_3 . На долю перечисленных веществ приходится около 99% золы.

Органическая часть торфа состоит из органических остатков, не потерявших естественного строения, и гумусовых веществ или перегноя. Гумусовыми веществами называют комплекс относительно устойчивых, обычно темноокрашенных органических соединений, образовавшихся в результате биологических и биохимических превращений остатков отмерших растительных и животных организмов. Групповой состав органического вещества как торфа, так и почвы разнообразен и представлен преимущественно следующими соединениями:

- азотистые вещества (белки, хлорофилл, алкалоиды);
- углеводы (клетчатка, гемицеллюлоза, крахмал, хитин, пектины);
- лигнин;
- липиды (жиры, воски);
- смолы, дубильные вещества, зола.

Одним из показателей, характеризующих потенциальную сорбционную емкость веществ, является влагоемкость, т. е. способность вещества (в данном случае — торфа) удерживать максимальное количество воды, которое соответствует в данное время внешним условиям среды. Это свойство зависит от состояния увлажненности, внешних условий среды, химического состава торфа.

С одной стороны, высокая влагоемкость (сорбционная способность) торфа, а также дешевизна, общедоступность и наличие огромных запасов делают его уникальным сырьем для производства сорбентов. С другой стороны, к недостаткам торфа может быть отнесена эта же самая его высокая влагоемкость. В регулировании влагоемкости торфяного сырья, вплоть до полной ее ликвидации, за-

¹ Каустобиолиты (от греч. *καυστός* — «горючий», *βίος* — «жизнь» и *λίθος* — «камень») — горючие полезные ископаемые, биолиты, содержащие большое количество углерода, органического происхождения, представляющие собой продукты преобразования остатков растительных (реже — животных) организмов под воздействием геологических факторов.

ключается одна из задач по созданию эффективного сорбента. Регулирование влагоемкости торфа может быть достигнуто путем его гидрофобизации.

Применение сорбентов на основе торфа неслучайно. Показано [11, 12], что с целью предотвращения миграции НП в подземные воды из загрязненных почв эффективно используются торфяные сорбенты. Это обусловлено пористой поверхностью и присутствием УОМ, что обеспечивает не только сорбцию НП, но и их частичную деструкцию.

В работах [13, 14] предлагается использовать метод сорбционной биоремедиации, в основе которого лежит внесение оптимальных доз натуральных сорбентов. С их помощью достигается снижение токсичности почв по отношению к микроорганизмам и растениям за счет сорбции загрязнителя и улучшение структуры почвы. Кроме того, с их применением обеспечивается локализация загрязнителя в слое почвы, что дает возможность избежать дорогостоящих этапов по выемке и транспортировке грунта и позволяет проводить работы по рекультивации *in situ*.

Основными механизмами благоприятного воздействия сорбентов на загрязненные участки нарушенных и загрязненных земель, наряду со снижением фито- и микроботоксичности за счет сорбции УВ, считают снижение гидрофобности, повышение влагоемкости и пористости почв [15].

Известно, что УОМ распространены практически повсеместно и при соблюдении определенных условий (температура, влажность, pH) за счет них происходит самоочищение почв, загрязненных УВ. Однако при высоких концентрациях УВ (более 5%) происходит ингибирование аборигенных УОМ, что приводит к замедлению процесса самоочищения [10].

В исследовании [9] доказана эффективность применения сорбента в присутствии биопрепарата.

2. Лабораторные испытания сорбента

Нефтеемкость товарного торфа (влажного) колеблется в пределах от 0,94 до 2,11, а сухого — от 1,11 до 2,29 кг/кг, однако для каждой испытываемой партии торфа характерно увеличение нефтеемкости при уменьшении содержания влаги. В связи с этим проведены исследования по установлению степени влияния влажности торфа на его сорбционные свойства. Исследования устанавливают четкую зависимость нефтеемкости торфа от влагосодержания.

Результаты исследования влияния влажности торфа на его нефтеемкость представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние влажности торфа на его нефтеемкость

Table 1. Influence of peat humidity on its oil capacity

Относительная влажность, %	Нефтеемкость, кг/кг
80,2	0,5
62,5	0,8
59,9	0,9
38,5	1,1
7,8	1,9

Значительное влияние на поглощение нефти оказывает содержание в торфе зольных элементов. Так, уменьшение зольности с 23,2 до 8,8% приводит к увеличению нефтеемкости на 50%, а уменьшение зольности с 8,8 до 3,9% — еще на 33%. Результаты исследования влияния зольности торфа на его нефтеемкость, с учетом 2-кратной повторности, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние зольности торфа на его нефтеемкость

Table 2. Influence of peat ash content on its oil capacity

Зольность торфа, %	Степень разложения, %	Нефтеемкость, кг/кг
23,2	60	1,8
8,8	40	2,4
8,8	40	2,6
3,9	20	3,3
3,9	20	3,8

Размер частиц торфа оказывает влияние как на количество, так и на скорость поглощения нефти с водной поверхности. Фракция торфа размером до 10 мм поглощает основное количество нефти за 15 мин. Через час после начала проведения опыта на водной поверхности оставалось 3—5% свободной нефти и некоторое количество непрореагировавшего торфа. Фракция торфа размером до 5 мм адсорбировала уже 98% нефти через 5 мин, а фракция размером до 1 мм адсорбировала 100% нефти всего за 3 мин.

Размол торфа до частиц размером не более 5 мм повысил нефтемкость на 12%, а до частиц размером не более 1 мм — на 41%. Результаты исследования влияния размера частиц торфа на его нефтемкость представлены в табл. 3, а скорости поглощения нефти с водной поверхности — в табл. 4.

Таким образом, по результатам исследований был получен алгоритм создания модели эффективного сорбента на базе торфа: наибольшей нефтемкостью обладает гидрофобный, низкочольный, слаборазложившийся торф, высушенный до 6—9% и размолотый до 1 мм.

Получение биосорбента

Биосорбенты в общем смысле представляют собой биологические системы, состоящие из сорбирующей части — носителя и биохимически активной части — УОМ. Технология получения биосорбента включает:

- получение биопрепарата на основе УОМ;
- получение сорбента-носителя,
- иммобилизацию микроорганизмов в порах сорбента;
- сгущение биомассы;

Таблица 3. Влияние размера частиц торфа на его нефтемкость

Table 3. Influence of particle size of peat on its oil capacity

Размер частиц торфа, мм	Нефтемкость, кг/кг
До 10	1,7...1,9
От 5 до 1	2,5

Таблица 4. Влияние размера частиц на скорость впитывания нефти

Table 4. Influence of particle size on oil absorption rate

Размер частиц, мм	Время поглощения, мин	% поглощения нефти
<10	15	95...97
<5	5	98
<1	3	100

- сушку готового продукта способом, позволяющим сохранить жизнеспособность МО.

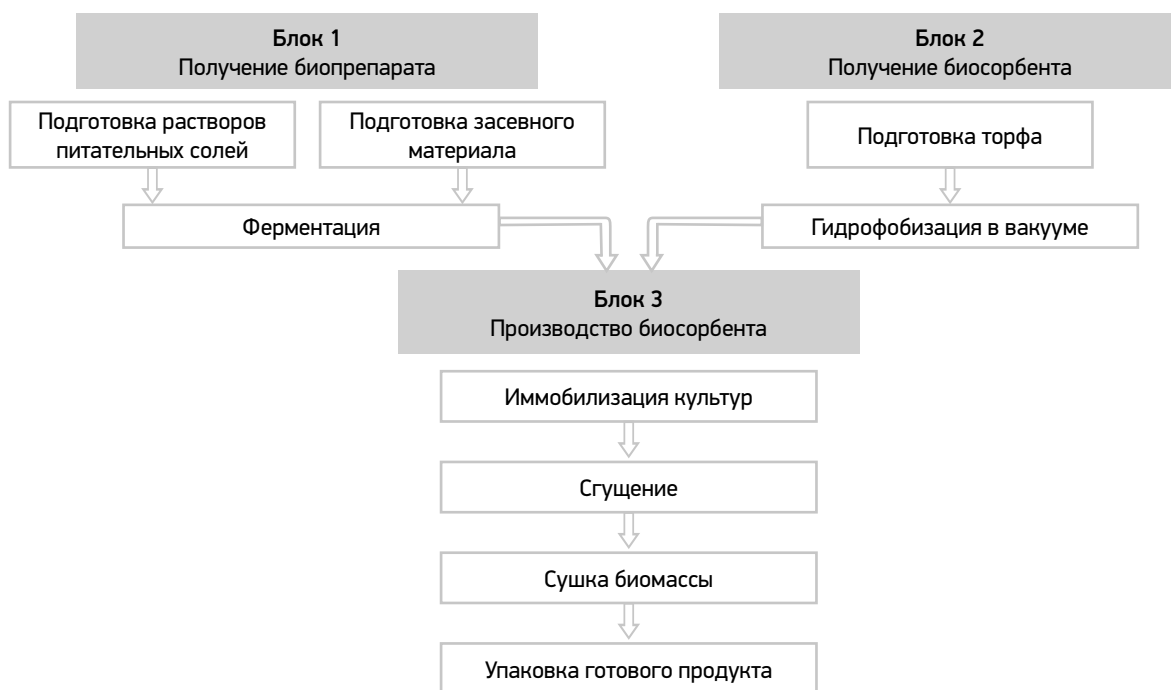


Рисунок. Схема производства биосорбента

Figure. Scheme of biosorbent production

На рисунке представлена общая схема получения биосорбента на основе гидрофобизированного торфа, включающая основные технологические этапы.

Наработка опытной партии биосорбента

Производство опытной партии биосорбента осуществлялось в соответствии с разработанной «Технологической инструкцией получения биосорбента». Процесс проводился на экспериментальной установке по производству биопрепаратов в нестерильных условиях, за исключением лабораторных стадий выращивания культуры УОМ.

Блок 1. Получение биопрепарата

Для производства биосорбента по результатам проведенных исследований были выбраны два вида микроорганизмов – дрожжи *Candida maltosa* ВКПМ У-3446 и бактерии *Dietzia maris* ВКПМ Ас-1824, наиболее эффективно окисляющие УВ. Нарботку биомассы каждой культуры осуществляли на УВ парафинового класса поочередно [10]. В качестве источника минерального питания использовали растворы солей:

- макроэлементов (K_2SO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$);
- микроэлементов ($CoSO_4 \cdot H_2O$, $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, KJ , $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, H_3PO_4).

Выращивание чистой культуры УОМ проводилось в течение 2 сут в лабораторном термостате при температуре 34–36 °С. С косяка микробную биомассу переносили в стерильных условиях в качалочные колбы объемом 750 мл, содержащие 100 мл стерильной питательной среды. Непосредственно перед засевом к питательной среде добавляли жидкий парафин в количестве 1% (1 мл), простерилизованный на кипящей водяной бане в течение 30–40 мин. Культивировали в течение 24–48 ч. Далее полученную культуру переносили в ферментер, предварительно простерилизованный и заполненный питательной средой, включающей водопроводную воду и раствор макро- и микроэлементов, жидкий парафин в количестве 2% об.

В ходе ферментации, в течение 36 ч, в автоматическом режиме поддерживались основные параметры процесса:

- рН = 6,8–7,2 (для бактериальной культуры) и рН = 4,0–4,2 (для дрожжевой культуры);
- температура среды 32–34 °С;
- расход воздуха 0,6 м³/ч.

В результате ферментации была получена суспензия микробной биомассы для последующей иммобилизации культур в порах сорбента.

Блок 2. Получение сорбента

Верховой торф средней степени разложения просушивали до воздушно-сухого состояния, далее просеивали через сито с размером ячеек 1 мм. Подготовленный торф помещали в термостойкую посуду и выдерживали при температуре 220 °С в течение 2 ч в сухожаровом шкафу в условиях вакуума.

Блок 3. Получение биосорбента

Полученный гидрофобный сорбент использовали в качестве носителя для иммобилизации УОМ. Иммобилизация клеток микроорганизмов на сорбенте осуществлялась при внесении его в среду на стадии замедления роста культуры при культивировании.

В ферментер с полезным объемом 7 л вносили навеску парафина массой 90 г. Массу навески сорбента рассчитывали на основе сорбционной емкости по парафину, составляющей 3,1 единицы. Количество внесенного сорбента составило 29 г.

Сорбент вносили после снижения значения растворенного кислорода в среде культивирования, свидетельствующего об активизации роста микроорганизмов. Совместно культивировали биомассу и сорбент в течение 30 мин. Далее сливали полученную массу из аппарата и пропускали через фильтр для удаления избыточной жидкости.

Сушка биосорбента осуществлялась лиофильным способом на сушилке типа GZL-0.5 в течение 36 ч. Биосорбент с дрожжевой и бактериальной культурой сушили отдельно.

Высушенный биосорбент собирался с лотков и упаковывался в отдельные бумажные пакеты — продукт с разными культурами.

Лабораторные испытания биосорбента. Проведение испытаний с грунтом

Образец почвы для проведения исследований был отобран в естественных природных условиях (верхний, плодородный слой 10–20 см). Из грунта были удалены крупные органические остатки в виде корней и надземной части растений (травы и кустарников), а также камни и твердые бытовые отходы.

Отбор проб грунта производился по [17] в 5–6 точках емкости.

В каждую из подготовленных емкостей для проведения испытаний (всего 72 шт.) поместили почву в количестве 100 г, взвешенную на весах.

Равномерно по всему объему почвы внесли загрязнитель. В первые 36 емкостей — светлые, в следующие 36 — темные нефтепродукты в количестве, обеспечивающем концентрацию в почве 5, 10, 15%, т.е. по 5, 10 и 15 г на образец почвы. Тщательно перемешали почву для равномерного распределения загрязнителя.

Количество биосорбента для внесения составляло 5, 10 и 15 г на каждый образец (исходя из соотношения загрязнитель/биосорбент 1:1). Необходимое количество биосорбента взвесили на весах, внесли равномерно по всей площади каждой емкости и еще раз перемешали грунт.

В контрольные варианты биосорбент не вносили.

Отбор проб осуществлялся еженедельно до прекращения проведения эксперимента.

Проведение испытаний с водой

Для проведения лабораторных исследований биосорбента в водных условиях использовалась дехлорированная водопроводная вода.

В емкости, подходящие для проведения испытаний (всего 72 шт.), налили по 1000 мл подготовленной воды.

Внесли отмеренное на весах количество УВ — по 50, 100 и 150 г в каждую емкость; в первые 36 емкостей — светлые, в следующие 36 — темные нефтепродукты. Нефтепродукты вливали тонкой струей в центр емкости.

Количество биосорбента для внесения составило 50, 100 и 150 г на каждый образец (исходя из соотношения загрязнитель/биосорбент 1:1).

Равномерно распределили отмеренное количество биосорбента по пятну загрязнения в образцах, кроме контрольных.

По истечении 3 ч массу биосорбента с сорбированными УВ собрали с водной поверхности.

Произвели отбор проб воды для определения остаточной концентрации УВ из всех загрязненных проб, включая контрольные.

Результаты лабораторных испытаний биосорбента. Результаты эксперимента с водой

Для определения остаточной концентрации УВ производили встряхивание емкостей на качалке в течение 5 мин. Далее, из середины объема жидкости отбирали пробы воды. В контрольных вариантах удаляли УВ-пленку, емкости также встряхивали на качалке в течение 5 мин, после чего из середины объема производился отбор проб.

В отобранных пробах проводилось измерение концентрации УВ методом ИК-спектрометрии.

Экстрагировали дважды порциями CCl_4 по 25 мл в течение 10 мин на качалке. После каждой экстракции пробу отстаивали до полного расслоения эмульсии. Нижний органический слой сливали из делительной воронки в коническую колбу. Объединенный экстракт осушали с 10 г прокаленного сульфата натрия в течение 30 мин.

Осушенный экстракт порциями пропускали через колонку с оксидом алюминия и собирали в мерную колбу на 50 мл.

Объем элюата доводили до метки CCl_4 , после чего закрывали колбу и тщательно взбалтывали.

На концентратометре ИКН-025 снимали ИК-спектры полученного раствора, пользуясь кюветой

Таблица 5. Степень очистки воды в лабораторных условиях

Table 5. Degree of water purification in laboratory conditions

Варианты опытов	Нефть сырая			Дизельное топливо		
	начальная концентрация УВ, %					
	5	10	15	5	10	15
Биосорбент <i>Candida maltosa</i>	97,2	96,8	92,8	83,5	82,9	80,5
Биосорбент <i>Dietzia maris</i>	97,8	97,1	93,2	82,7	82,1	80,2
Биосорбент <i>C. maltosa</i> + <i>D. maris</i>	98,5	97,4	94,6	84,1	83,6	81,8
Контроль	58,2	46	31,3	32,2	26	21

с толщиной слоя 50 мм. Измеряли оптическую плотность при волновом числе 2962 см^{-1} .

По результатам испытаний были получены данные снижения концентрации УВ в исследуемых образцах, представленные в табл. 5.

Результаты эксперимента с почвой

Из выбранного грунта были удалены крупные включения (камни, органические остатки в виде корней и надземных частей растений). В подготовленные пластиковые емкости насыпали по 100 г грунта. Увлажняли грунт из пульверизатора для достижения влажности порядка 70%. Затем равномерно по всей поверхности почвы в каждую емкость вносили загрязнитель, количество повторностей опыта 3. В первые 36 емкостей вносили дизельное топливо в количестве 5, 10 и 15 г, создавая концентрацию загрязнителя 5, 10 и 15% соответственно; в другие 36 — сырую нефть в тех же процентных соотношениях. Перемешивание (культивацию) в емкостях проводили шпателем. При достижении равномерного распределения загрязнителя по всему объему емкостей вносили биосорбенты равномерно по всей поверхности с последующим тщательным перемешиванием.

Концентрацию УВ в отобранных пробах измеряли методом ИК-спектрометрии.

Обобщенные данные эффективности применения биосорбентов представлены в табл. 6.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности утилизации УВ-загрязнений как легких, так и тяжелых фракций. Однако исследованные биосорбенты, в сравнении с биопрепаратами, характеризуются несколько меньшей

эффективностью очистки почвы, что может быть объяснено снижением общего количества клеток микроорганизмов, иммобилизованных в порах гидрофобизированного торфа, по сравнению с чистым биопрепаратом.

Наилучшие результаты были получены при использовании биосорбента с двумя культурами микроорганизмов *Candida maltosa* и *Dietzia maris* при очистке почвы от дизельного топлива с начальным его содержанием 5%. Результат очистки за период 28 суток составил 69,4%, в то время как контрольный образец показал степень очистки 20,4%, что может быть объяснено активизацией аборигенной микрофлоры плюс естественным испарением летучих фракций в процессе испытаний.

При очистке почвы от нефти лучшие результаты также были получены в вариантах с применением биосорбента с двумя культурами *Candida maltosa* и *Dietzia maris*, при начальном содержании нефти 5 и 10% и степенью очистки 64,8 и 64,6% соответственно. В контрольных образцах при концентрации нефти 5 и 10% степень очистки составила 15 и 24,8%.

Во всех вариантах опыта с концентрацией загрязнителя 15% степень очистки от УВ была несколько ниже, чем в вариантах с концентрациями загрязнителя 5 и 10%, что объясняется токсическим воздействием на микроорганизмы высоких концентраций УВ.

В вариантах эксперимента с применением биосорбентов с монокультурами микроорганизмов степень очистки почвы от загрязнения нефтью при начальной концентрации УВ 10% была несколько выше, чем при начальной концентрации 5%, что может быть объяснено тем, что при 5%-ной концен-

Таблица 6. Степень очистки почвы в лабораторных условиях

Table 6. Degree of soil purification in laboratory conditions

Варианты опытов	Нефть сырая			Дизельное топливо		
	начальная концентрация УВ, %					
	5	10	15	5	10	15
Биосорбент <i>Dietzia maris</i>	58	60,7	54,6	65,8	62,9	57,8
Биосорбент <i>Candida maltosa</i>	57,2	63,9	58	64,2	64,1	61,2
Биосорбент <i>C. maltosa</i> + <i>D. maris</i>	64,8	64,6	63,6	69,4	65,5	65,4
Контроль	15	24,8	8,6	20,4	29,8	13,87

трации УВ процесс очистки проходит только под воздействием иммобилизованных на гидрофобизированном торфе культур микроорганизмов, подавляющих активность аборигенной микрофлоры. В то время как при возрастании концентрации УВ до 10% в процесс очистки вовлекается и аборигенная микрофлора, что приводит к повышению эффективности очистки по сравнению с вариантами с 5%-ным загрязнением.

По результатам проведенных исследований можно сказать, что такая лабораторная отработка технологических параметров позволит существенно уменьшить экологический риск, связанный с нереализуемостью последующей рекультивации загрязненных сред *in situ*.

Заключение

В описанных исследованиях был апробирован лабораторный способ проверки технологии биоочистки для последующего применения в полевых условиях при проведении биоремедиации. Такой подход позволит за короткий период времени (2—3 месяца) получить необходимые технологические параметры (дозы торфа, необходимый консорциум УОМ, температура и пр.), которые затем будут с гарантией работать в полевых условиях.

Результаты лабораторных испытаний показали, что разработанный биосорбент обладает достаточными сорбционными свойствами и высокой деформирующей способностью в отношении углеводородов нефти.

Для оценки экологического риска, возникающего при ЧС, и эффективности управления им в ходе ремедиационных работ по ликвидации последствий загрязнения поверхностей воды и почвы проводился мониторинг остаточной концентрации УГВ в загрязненной среде с помощью широко применяемого метода ИК-спектрометрии. Испытания разработанного биосорбента позволили создать тест-систему предварительной проверки реализуемости технологии биоремедиации и сформировать систему управления экологическим риском при загрязнении почвы и воды с помощью моделирования ЧС в виде аварийного разлива нефтепродуктов.

Кроме того, следует учитывать, что применение торфа как сорбента позволяет также снижать негативное воздействие на микроорганизмы и других

загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу в процессах промышленного производства, подготовки нефти и газа к транспорту и самой транспортировке. Среди них важное значение имеют тяжелые металлы, которые могут и содержаться в самой разлитой нефти, и поступать с атмотехногенными осадками. Накопление тяжелых металлов в торфе, используемом в качестве биосорбента при загрязнении нефтью почв и природных вод, позволяет устранить негативное действие этих поллютантов и усилить биоразложение нефтепродуктов [8]. Кроме того, применение торфа как биосорбента может способствовать нейтрализации кислотных компонентов в самих загрязненных НП средах, тем самым ускорить их биodeградацию [6].

Таким образом, проведенные исследования подтверждают возможность управления экологическими рисками при биоремедиации нефтезагрязненных сред с применением разработанных продуктов на основе консорциумов штаммов УОМ. Полученные результаты показали положительную динамику в процессе очистки опытных образцов, что свидетельствует о высокой эффективности применения биопрепарата и биосорбента как средств для очистки и ремедиации ООС при ликвидации последствий ЧС на предприятиях НГК.

Литература [References]

1. Владимиров В.А. Управление рисками чрезвычайных ситуаций, обусловленных разливами нефти // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. Т. 3. 2013. № 1. С. 434—471 [Vladimirov V.A. Risk management of emergency situations caused by oil spills // The strategy of civilian protection: issues and research. Vol. 3. 2013. No. 1. P. 434—471 (In Russ.)]
2. Харченко В.С., Егорова Н.Е. Моделирование стратегии управления риском аварийных разливов для нефтяной компании // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 11. С. 47—49 [Kharchenko V.S., Egorova N.E. Oil Spill Risk Management Strategy Modeling. Ecology and Industry of Russia // Ecology and Industry of Russia. 2015. Vol. 19. No. 11. P. 47—49 (In Russ.)] <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-47-49>
3. Bashkin V. Modern Biogeochemistry: Environmental Risk Assessment // Springer. 2006. 444 pp.
4. Башкин В.Н. Управление экологическими рисками для предотвращения экологических катастроф // Пробле-

- мы анализа риска. Т. 17. 2020. № 3. С. 8—9 [Bashkin V.N. Environmental Risk Management to Prevent Environmental Disasters // Issues of risk analysis. Vol. 17. 2020. No. 3. P. 8—9 (In Russ.)] <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-3-8-9>
5. Trubitsina O. P. Ecological Monitoring of Acid Deposition in the Arctic Region. The Open Ecology Journal. 2015. No. 8. P. 21—31.
6. Трубицина О. П. Кислотно-щелочные особенности осадков прибрежной зоны Архангельской области: ретроспективный анализ // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 4. С. 17—25. [Trubitsina O. P. Acid-alkaline features of precipitation in the coastal zone of the Arkhangelsk region: a retrospective analysis // Bulletin of the Northern (Arctic) federal university. Series: Natural Sciences. 2016. No. 4. S. 17—25 (In Russ.)]. doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.17
7. Пинский Д. Л. Современные представления о механизмах поглощения тяжелых металлов почвами // Эволюция, функционирование и экологическая роль почв как компонента биосферы. Пушчино. 2020. С. 55—64. [Pinsky D. L. Modern ideas about the mechanisms of absorption of heavy metals by soils // Evolution, functioning and ecological role of soils as a component of the biosphere. Pushchino. 2020. P. 55—64 (In Russ.)]
8. Водяницкий Ю. Н., Савичев А. Т., Трофимов С. Я., Шишконова Е. А. Накопление тяжелых металлов в загрязненных нефтью торфяных почвах // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1109—1114. [Vodyanitsky Yu. N., Savichev A. T., Trofimov S. Ya., Shishmakova E. A. Accumulation of heavy metals in oil-contaminated peat soils // Soil Science. 2012. No. 10. P. 1109—1114 (In Russ.)]
9. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти / Е. А. Артукх, А. С. Мазур, Т. В. Украинцева, Л. В. Костюк // Известия СПбГТИ(ТУ). 2014. № 26. С. 58—66. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22625304> (Дата обращения: 13.11.2019) [Prospects for the use of biosorbents for cleaning reservoirs in the elimination of emergency oil spills / E. A. Artyukh, A. S. Mazur, T. V. Ukraintseva, L. V. Kostyuk // Bulletin of St PbSIT(TU). 2014. No. 26. P. 58—66. [Electronic resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22625304> (Accessed: 13.11.2019) (In Russ.)]
10. Каменщиков Ф. А. Нефтяные сорбенты / Ф. А. Каменщиков, Е. И. Богомольный. Москва; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. 268 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/kamenschikov-f-a-bogomolnyy-e-i-neftyanye-sorbenty_7eec5aaa27c.html (Дата обращения: 27.08.2019) [Kamenshchikov F. A. Oil sorbents / F. A. Kamenshchikov, E. I. Bogomolny. Moscow; Izhevsk: Regular and chaotic dynamics, 2005. 268 p. [Electronic resource]. URL: https://www.studmed.ru/kamenschikov-f-a-bogomolnyy-e-i-neftyanye-sorbenty_7eec5aaa27c.html (Accessed: 27.08.2019) (In Russ.)]
11. Галиулин Р. В., Галиулина Р. А., Башкин В. Н., Арабский А. К. Управление риском загрязнения подземных вод нефтью // Проблемы анализа риска. Т. 17. 2020. № 3. С. 10—15. [Galiulin R. V., Galiulina R. A., Bashkin V. N., Arabsky A. K. Management by risk of underground waters contamination by oil // Issues of Risk Analysis. Vol. 17. 2020. No. 3. P. 10—15 (In Russ.)] <https://doi.org/10.32686/1812-5220-20-17-3-10-15>
12. Башкин В. Н., Алексеев А. О., Галиулин Р. В., Галиулина Р. А., Арабский А. К. Риск нарушенных и загрязненных почв острова Белый (Карское море) // Проблемы анализа риска. Т. 14. 2017. № 2. С. 22—29. [Bashkin V. N., Alekseev A. O., Galiulin R. V., Galiulina R. A., Arabsky A. K. Risk of Disturbed and Contaminated Soils of the Island Bely (Kara Sea) // Issues of Risk Analysis. Vol. 14. 2017. No. 2. P. 22—29. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2017-14-2-22-29>
13. Яценко В. С., Стрижакова Е. Р., Васильева Г. К., Зиннатшина Л. В. Способ снижения экологических рисков при проведении ин ситу биоремедиации нефтезагрязненных почв // Проблемы анализа риска. Т. 11. 2014. № 5. С. 6—17. [Yatsenko V. S., Strizhakova E. R., Vasilyeva G. K., Zinnatshina L. V. Method of Ecological Risks Reduction During in Situ Bioremediation of Petroleum Contaminated Soils // Issues of Risk Analysis. Vol. 11. 2014. No. 5. P. 6—17 (In Russ.)]
14. Vasilyeva G. K. Biodegradation of 3,4-dichloroaniline and 2,4,6-trinitritluene in soil in the presence of natural adsorbents / G. K. Vasilyeva, L. P. Bakhaeva, E. R. Strijakova, P. J. Shea // Environ Chem Let. // 2003. Vol. 1. No. 3. P. 176—183.
15. Vasilyeva G. K. Use of activated carbon for soil bioremediation // In: Viable methods of soil and water pollution monitoring, protection and remediation / G. K. Vasilyeva, E. R. Strijakova, P. J. Shea // (I. Twardowska, H. E. Allen and M. H. Haggblom, eds). Serial NATO Collection, Netherlands: Springer. 2006. P. 309—322.
16. Разработка биосорбента на основе углеводород-окисляющих микроорганизмов, иммобилизованных на гидрофобизированном торфе / Н. Б. Пыстина, Е. Л. Листов, В. А. Лужков [и др.] // Газовая промышленность,

2013. №2 (686). С. 82—86 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-biopreparata-na-osnove-rizosfernyh-i-azotfiksiruyuschiy-uglevodorodokislyayuschiy-mikroorganizmov-dlya-rekultivatsii-i> (Дата обращения: 11.10.2019) [Development of a biosorbent based on hydrocarbon-oxidizing microorganisms immobilized on hydrophobized peat / N. B. Pystina, E. L. Listov, V. A. Luzhkov [et al.] // Gas industry, 2013. No. 2 (686). P. 82—86 [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-biopreparata-na-osnove-rizosfernyh-i-azotfiksiruyuschiy-uglevodorodokislyayuschiy-mikroorganizmov-dlya-rekultivatsii-i> (Accessed: 11.10.2019) (In Russ.)]

17. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа [перездание: 2008-08]. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-17-4-4-02-84> (Дата обращения: 03.09.2019). [GOST 17.4.4.02-84. Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis [reprint: 2008-08]. [Electronic resource] URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-17-4-4-02-84> (Accessed: 03.09.2019) (In Russ.)]

Сведения об авторах

Башкин Владимир Николаевич: доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Количество публикаций: более 400

Область научных интересов: геоэкологические риски, газовая промышленность, биогеохимия

ResearcherID: J-4621-2018

Scopus Author ID: 7005340339

Контактная информация:

Адрес: 142292, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2-1, ИФХБПП РАН

E-mail: vladimrbashkin@yandex.ru

Лужков Виктор Александрович: научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Количество публикаций: 8, в т. ч. 5 статей

Область научных интересов: биоремедиация загрязненных почв и вод

Контактная информация:

Адрес: 142717, Московская обл., пос. Развилка, 5537-й Проектируемый проезд, владение 15, ВНИИГАЗ, строение 1

E-mail: v_luzhkov@vniigaz.gazprom.ru

Трубицина Ольга Петровна: кандидат географических наук, доцент, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ имени М.В. Ломоносова)

Количество публикаций: более 80

Область научных интересов: геоэкологические риски, Арктика, нефтегазовая промышленность, атмосферный воздух, мониторинг кислотных выпадений

Scopus Author ID: 57191332613

ORCID: 0000-0001-9847-9328

Контактная информация:

Адрес: 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17

E-mail: test79@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 30.12.2020

Принята к публикации: 14.01.2021

Дата публикации: 26.02.2021

The paper was submitted: 30.12.2020

Accepted for publication: 14.01.2021

Date of publication: 26.02.2021