

ВЫСШИЕ ВОДОРОСЛИ В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

**И.Г. Шайхиев, В.О. Дряхлов, З.Т. Санатуллова, А.М. Зайнуллин,
А.М. Мадякина, С.Н. Савельев, О.Д. Арефьева, О.В. Нестерова**

Ильдар Гильманович Шайхиев (ORCID 0000-0001-9160-0412)*, Владислав Олегович Дряхлов (ORCID 0000-0003-2136-9221), Земфира Талгатовна Санатуллова (ORCID 0009-0005-1620-3616), Айдар Маратович Зайнуллин (ORCID 0009-0000-7246-1701), Альмира Мустакимовна Мадякина (ORCID 0000-0002-2664-8812), Сергей Николаевич Савельев (ORCID 0000-0002-2370-0531)

Кафедра инженерной экологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015

E-mail: ildars@inbox.ru*, vladisloved@mail.ru, zemka511@yandex.ru, zainullin@list.ru, almi_almi@mail.ru, savelievs@rambler.ru

Ольга Дмитриевна Арефьева (ORCID 0000-0001-8001-4370)

Департамент нефтегазовых технологий и нефтехимии, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Российская Федерация, 690922

E-mail: arefeva.od@dvfu.ru

Ольга Владимировна Нестерова (ORCID 0000-0002-3463-0962)

Кафедра почвоведения, Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Российская Федерация, 690922

E-mail: nesterova.ov@dvfu.ru

Нефть играет очень важную роль в хозяйственной деятельности человека, однако является потенциальным источником загрязнения окружающей среды. Поддержание устойчивости экосистем, соответственно, благополучия населения заключается в повышении эффективности природоохранных мероприятий. Внедрение инновационных энерго- и ресурсосберегающих технологий очистки сточных вод позволит снизить антропогенную нагрузку на водные среды. В промышленности недостаточно очищенная от углеводородов вода подвергается многократному разбавлению до нормативных требований, либо хранится в течение длительного времени в резервуарах, хранилищах или нефтяных амбарах. Поступление воды, загрязненной нефтью и нефтепродуктами, в объекты окружающей среды приводит к деградации биоценозов и к изменениям физико-химических свойств их ареала обитания. На основании вышеизложенного обобщены сведения из отечественных и зарубежных литературных источников по использованию высушенной биомассы макроводорослей в качестве сорбционных материалов для удаления нефти и нефтепродуктов из морской воды, и пресноводных водоемов. Приведены сведения по физиологии некоторых видов и родов морских водорослей, исследованных в качестве биосорбентов углеводородов, и местам их ареала произрастания в водной среде. Показано, что бурые, зеленые и красные водоросли различных видов могут эффективно извлекать нефть, компоненты нефти и продукты ее переработки из водных сред. Сделан вывод, что огромные объемы биомассы макрофитов, высокие темпы роста биомассы морских водорослей, высокая эффективность извлечения различных углеводородов делают перспективными дальнейшие исследования по использованию морских водорослей для извлечения нефти и продуктов ее переработки из соленых и пресноводных водоемов.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, морские и пресноводные водоросли, удаление

HIGHER ALGAE AS SORPTIONAL MATERIALS FOR HYDROCARBON SPILL RESPONSE ON WATER SURFACE (REVIEW)

I.G. Shaikhiev, V.O. Dryakhlov, Z.T. Sanatullova, A.M. Zainullin,
A.M. Madyakina, S.N. Savelyev, O.D. Arefieva, O.V. Nesterova

Ildar G. Shaikhiev (ORCID 0000-0001-9160-0412)*, Vladislav O. Dryakhlov (ORCID 0000-0003-2136-9221), Zemfira T. Sanatullova (ORCID 0009-0005-1620-3616), Aydar M. Zainullin (ORCID 0009-0000-7246-1701), Almira M. Madyakina (ORCID 0000-0002-2664-8812), Sergey N. Savelyev (ORCID 0000-0002-2370-0531)

Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University, Karl Marks st., 68, Kazan, 420015, Russia

E-mail: ildars@inbox.ru*, vladisloved@mail.ru, zemka511@yandex.ru, zainullin@list.ru, almi_almi@mail.ru, savelyevsn@rambler.ru

Olga D. Arefieva (ORCID 0000-0001-8001-4370)

Department of Oil, Gas and Petrochemical Industry, Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russia

E-mail: arefeva.od@dvfu.ru

Olga V. Nesterova (ORCID 0000-0002-3463-0962)

Department of Soil Science, Far Eastern Federal University, Ajax Bay, 10, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russia

E-mail: nesterova.ov@dvfu.ru

Oil is a benefit for people in the form of energy and petroleum products, but when the environment is excessively polluted with hydrocarbons, the ecological balance is disrupted. Maintaining the sustainability of ecosystems and, accordingly, the well-being of the population consists of increasing the effectiveness of environmental protection measures. The introduction of innovative energy- and resource-saving technologies for wastewater treatment will reduce the anthropogenic load on aquatic environments. In industry, water insufficiently purified from hydrocarbons is subjected to repeated dilution to meet regulatory requirements, or is stored for a long time in tanks, storage facilities or oil pits, ultimately entering the environment, which leads to degradation of biocenoses with subsequent disruption of physiological activity and death, caused by the introduction of organic toxicants into a living organism, as well as changes in the physicochemical properties of their habitat. Based on the above, information from domestic and foreign literary sources on the use of dried macroalgae biomass as sorption materials for the removal of oil and petroleum products from seawater and freshwater bodies is summarized. Information is provided on the physiology of some species and genera of seaweeds studied as biosorbents of hydrocarbons and the places where they grow in the aquatic environment. It has been shown that brown, green and red algae of various types can effectively extract oil, oil components and products of its processing from aquatic environments. It is concluded that the huge volumes of macrophyte biomass, high growth rates of seaweed biomass, and high efficiency of extraction of various hydrocarbons make promising further research on the use of seaweed to extract oil and its products from salt and freshwater bodies of water.

Keywords: oil, petroleum products, marine and freshwater algae, removal

Для цитирования:

Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О., Санатуллова З.Т., Зайнуллин А.М., Мадьякина А.М., Савельев С.Н., Арефьева О.Д., Нестерова О.В. Высшие водоросли в качестве сорбционных материалов для ликвидации разливов углеводородов на водной поверхности (обзор литературы). *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 4. С. 6–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256804.7079.

For citation:

Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O., Sanatullova Z.T., Zainullin A.M., Madyakina A.M., Savelyev S.N., Arefieva O.D., Nesterova O.V. Higher algae as sorptional materials for hydrocarbon spill response on water surface (review). *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 4. P. 6–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256804.7079.

ВВЕДЕНИЕ

Разливы нефти и продуктов ее переработки входят, в настоящее время, в список приоритетных экологических проблем современности. Особенно чувствительными к попаданию нефти и нефтепродуктов (НП) являются водная среда и гидробионты. Выявлено, что 1 т нефти при попадании на водную поверхность образует пленку площадью 12 км² [1]. Нефтяная пленка на поверхности воды способствует уменьшению диффузии кислорода воздуха в толщу воды, выведению углекислого газа в атмосферу, что неблагоприятно сказывается на жизнедеятельности высших и низших гидробионтов. Налипая на кожный покров морских и речных животных и перья птиц, нефть способствует снижению теплоизоляционных свойств, приводя, зачастую, к их гибели.

Кроме того, меняются органолептические параметры воды. Она становится непригодной для водопользования из-за специфического запаха. При попадании нефти на прибрежные участки водоемов, последние становятся непригодными для купания, водопотребления, орошения и других назначений.

Легкие фракции углеводородов нефти, испаряясь, способствуют загрязнению воздушного бассейна в районе нефтеразлива. По мере испарения легколетучих компонентов, более высокомолекулярные нефтяные фракции в виде гудрона или нефтяных смол оседают на дно водоемов, вызывая вторичное загрязнение. Все вышеназванное требует безотлагательных мер по удалению пленок нефти и НП с водной поверхности.

Все методы для удаления пленок нефти и НП с водной поверхности подразделяются на 4 группы: механические, биологические, термические и физико-химические [2-12]. Механический сбор пленок углеводородов осуществляется специальными средствами – скиммерами. Биологические методы предполагают внесение консорциумов микроорганизмов, которые используют углеводороды нефти в своем метаболизме. Недостатком метода является довольно большой временной отрезок до полной утилизации, в течение которого часть углеводородов слипается и оседает на дно водоема или эмульгируется. Термические методы осуществляются сжиганием нефти. Недостатком данного способа является то, что он может быть осуществлен в том случае, когда нефтяная пленка имеет большую толщину и поддерживает горение. К тому же, продукты сгорания способствуют загрязнению воздушного бассейна.

К физико-химическим методам удаления или утилизации нефти относятся деэмульгация, окисление, адсорбция, экстракция и др. Анализ литературных источников показал, что наиболее часто применяемым способом извлечения углеводородов с водной поверхности и из толщи воды является адсорбционный [13-20]. Последний основан на использовании различных твердых веществ, желательных с развитой поверхностью, для сорбции нефти и НП и дальнейшей их утилизацией.

Как показывает мировой опыт, в качестве нефтесорбентов могут использоваться различные органические вещества искусственного происхождения, такие как, в частности, пенополиуретан [21, 22], полиэтилен [23, 24], полипропилен [24-26] и др. Особый интерес представляют лигноцеллюлозные отходы от переработки сельскохозяйственного сырья и древесной биомассы [27-37].

Тем не менее, штатные нефтесорбенты, число которых насчитывается в мире более 200, или альтернативные из лигноцеллюлозного сырья, не всегда доступны в месте разлива нефти, особенно на океанских просторах, когда необходимо срочно локализовать и утилизировать сорбированные углеводороды. В этой связи, весьма интересными и перспективными сорбционными материалами для ликвидации разлива нефти или НП могут оказаться морские и речные водоросли. Последние часто выбрасываются во время штормов на берег суши, и в высушенном виде могут использоваться в качестве нефтесорбентов.

Настоящий обзор призван кратко осветить предыдущие работы, опубликованные в мировой литературе, по использованию морских и речных водорослей в качестве сорбционных материалов для ликвидации нефтеразливов с водной поверхности. Следует отметить, что биомасса водорослей широко используется человечеством в различных отраслях народного хозяйства [38]. В частности, водоросли применяются в качестве источника пищи для человека и животных [39], в косметической промышленности [40, 41], в индустрии строительства, для получения биотоплива [42] и многих других отраслях промышленного производства [43].

Следует отметить, что в мировой литературе есть несколько обзорных работ по использованию морских макро- и микроводорослей в качестве сорбционных материалов ионов металлов, красителей, пестицидов и других органических соединений из водных сред [44-50]. Информация по адсорбции углеводородов морскими и речными макроводорослями ограничена, носит фрагментарный характер и не систематизирована.

УДАЛЕНИЕ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ СРЕДЫ БИОМАССОЙ МОРСКИХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

Исследовано удаление сырой нефти с водной поверхности биомассой водоросли посидония океаническая (*Posidonia oceanica*) [51], широко известной как нептуновая трава. Водоросль является видом, эндемичным для Средиземного моря. Образует большие подводные луга, которые являются важной частью экосистемы. Шарики волокнистого материала из листьев посидонии океанической, известные как эгагропили или шарики Нептуна, прибывает к близлежащим береговым линиям. Встречается на глубинах от 1 до 35 м, в зависимости от прозрачности воды. Подземные корневища и корни стабилизируют растение, в то время как прямостоячие корневища и листья уменьшают накопление ила. Листья лентовидные, собраны в пучки по 6 или 7 штук и достигают 1,5 м в длину. Средняя ширина листьев составляет около 10 мм. Листья ярко-зеленые, с возрастом становятся коричневыми, и имеют от 13 до 17 параллельных жилок. Край листа округлый или иногда отсутствует из-за повреждений [52].

Определено, что максимальная нефтеемкость нативных и измельченных листьев посидонии океанической составили 5,32 г/г и 14,0 г/г, соответственно. Для имитации нефтяного загрязнения на водной поверхности, дозировка нефти составляла от 5,5 г/дм³ до 40 г/дм³. В том случае, если сорбция нефти осуществлялась с водной поверхности, нефтепоглощение составило, соответственно, 4,74 г/г и 12,8 г/г. Определено, что изотермы поглощения нефти биомассой водоросли более точно описываются моделями Редлиха-Петерсона ($R^2 = 0,902$) и Джовановича ($R^2 = 0,899$) [51]. Кинетика процесса сорбции нефти более точно описывается моделью псевдо-первого порядка. Также выявлено, что ввиду высокой гидрофильности листьев посидонии, значение максимального водопоглощения выше показателя максимального нефтепоглощения. Выявлено, что обработка сорбционного материала химическими реагентами способствует некоторому увеличению нефтеемкости со снижением водопоглощения. Так модификация измельченной биомассы *Posidonia oceanica* 0,5 М растворами $ZnCl_2$, H_3PO_4 или HCl позволяет увеличить значение максимальной нефтеемкости до 22,93 г/г, 19,79 г/г и 19,35 г/г, соответственно [53].

Исследовано удаление сырой нефти и отработанного машинного масла из морской и речной воды высушенной биомассой водоросли вида

Enteromorpha intestinalis, другое латинское название *Ulva intestinalis* – зеленая водоросль из семейства *Ulvaceae*, известная под общими названиями морской салат, зеленая трава-наживка и трава ламинарии. Широко распространена в морской среде по всему миру. Листья имеют ветви и полностью трубчатые, расширяющиеся в ширину до середины слоевища, достигая 15 см в длину и более. Клетки расположены неравномерно, а хлоропласт в форме капюшона и расположен в стороне, как правило, только с одним пиреноидом. Размеры вида могут составлять от 10 до 30 см в длину и 6-18 см в ширину. Они также имеют закругленные края.

При проведении экспериментов в следующих условиях: время контактирования сорбата с биомассой водоросли – 10 мин, pH = 7-9, размер частиц сорбционного материала – 1-2 мм, дозировка биосорбента – 10 г/дм³, сорбционная емкость по нефти и отработанному маслу в морской и речной воде составили по 2,5 г/г и 3,33 г/г, соответственно. Выявлено, что биосорбция нефтяных углеводородов из морской воды оказалась более эффективной, чем из пресной. Установлено, что адсорбционные зависимости углеводородов более четко описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса подчиняется модели псевдо-второго порядка [54].

Для улучшения сорбционных характеристик по дизельному топливу, биомасса *Enteromorpha intestinalis* обрабатывалась силоксановой жидкостью (брутто-формула $C_{14}H_{32}O_3Si$). Определено, что модификация биомассы растения гидрофобным реагентом способствует увеличению максимальной сорбционной емкости по дизельному топливу на 27,7% и достижению названным показателем значения 14,56 г/г. Определено, что после 6 циклов регенерации сорбционная емкость полученного сорбционного материала уменьшилась на 20% [55].

Для извлечения нефти из водонефтяных эмульсий с водной поверхности и толщи воды возможно использовать не только водоросли, растущие в слое воды, но и плавающие на водной поверхности. Так, в частности, указывается использование биомассы водных растений рода Сальвиния (*Salvinia sp.*) для адсорбции нефти из водонефтяной эмульсии. Определялось влияние концентрации НП, времени контактирования, температуры и pH водной среды на эффективность извлечения нефти. Определено, что максимальная адсорбционная емкость *Salvinia sp.* была получена через 15 мин контактирования и составила 574,86 мг/г в эмульсии вида «масло-в-морской воде» и 525,92 мг/г для

эмульсии вида «масло-в-речной воде». Также определено, что модель Фрейндлиха более точно описывает изотерму адсорбции, а кинетика процесса описывается моделью внутричастичной диффузии. Термодинамические параметры процесса соответствуют протеканию физической, самопроизвольной и обратимой адсорбции [56].

ИЗВЛЕЧЕНИЕ АЛИФАТИЧЕСКИХ, АРОМАТИЧЕСКИХ И ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

Исследована биосорбция фенола из модельных вод с начальной концентрацией 100 мг/дм^3 биомассой водорослей Лессония чернеющая (*Lessonia nigrescens* Bory) и Макроцистис цельнолистный (*Macrocystis integrifolia* Bory) [57].

Lessonia nigrescens, серый сорняк или гигантский серый сорняк - южноамериканский вид водорослей рода *Lessonia*. Ламинария *Lessonia nigrescens* Bory является наиболее экологически и экономически важной водорослью в скалистых и мелководных приливно-отливных местообитаниях вдоль умеренного тихоокеанского побережья Южной Америки.

Макроцистис цельнолистный (*Macrocystis integrifolia*) имеет стелющееся основание с ризоидами (ризом). Слоевище многолетнее, высотой до 5-8 м, длина пластин 25-60 см. Растет до глубины 7 м у Тихоокеанского побережья Америки от острова Ванкувер до залива Камель в Калифорнии, у побережья Перу и северной части Чили. Стволы многократно разветвленные. Первые 2-3 ветвления снизу дихотомические, остальные односторонние. Верхушечная пластинка отклоняет новые пластинки с одной своей стороны посредством косых разрывов. Перед каждой пластинкой ветвь обычно расширена в грушевидно-веретеновидный воздушный пузырь. Благодаря воздушным пузырям и длинным ветвям основная часть слоевища макроцистиса плавает у поверхности моря.

Выявлено, что при дозировке биомассы водорослей 1 г/дм^3 и начальной концентрации фенола 100 мг/дм^3 , эффективность адсорбции определяется значением pH водной среды. Найдено, что наибольшая степень извлечения фенола достигается при $\text{pH} = 10$ и составляет ~ 10% при использовании биомассы *Lessonia nigrescens* и ~ 35% с применением биомассы *Macrocystis integrifolia*. Сильная зависимость адсорбции от pH предполагается на уровне водной химии фенола, обусловленной исключительно полярным механизмом, который включает образование водородных связей с гид-

роксильными группами, пространственно расположенными в полисахаридных цепях, образующих структуру водорослей [57, 58].

Исследовано удаление фенола из модельных вод биомассой водорослей *Sargassum sp.* и *Chaetomorpha* [59].

Морские водоросли рода Саргассум (*Sargassum*) из отряда Fucales класса Phaeophyceae распространены по всем океанам мира умеренного и тропического климата, где они обычно обитают на мелководье и в коралловых рифах, а род широко известен своими планктонными (свободно плавающими) видами. Листья водорослей этого рода могут достигать длины в несколько метров. Обычно они коричневого или темно-зеленого цвета и состоят из опоры, ножки и листочка. Оогонии и антеридии встречаются в зачатках, встроенных в сосуды на специальных ветвях. У некоторых видов есть похожие на ягоды газонаполненные пузыри, благодаря которым листья плавают, способствуя фотосинтезу. Многие из них имеют грубую, липкую текстуру, которая наряду с прочным, но гибким телом помогает им противостоять сильным течениям воды [60]. В обзорах [61, 62] приводится информация по использованию биомассы различных видов саргассовых водорослей в качестве сорбционных материалов для извлечения ионов металлов и других поллютантов из водных сред.

Chaetomorpha – род зеленых водорослей из семейства кладофоровых (*Cladophoraceae*). Представители этого рода могут называться общим названием морской изумруд. Водоросли рода состоят из макроскопических нитей цилиндрических клеток. Род характеризуется неразветвленными нитями, что является его отличительным признаком.

Оценивалось влияние значений pH, дозы сорбционного материала, начальной концентрации фенола, солености и наличия мешающих веществ на извлечение биомассой водорослей родов *Sargassum sp.* и *Chaetomorpha sp.* Выявлено, что наибольшее удаление фенола наблюдается при $\text{pH} = 10$. Найдено, что изотермы адсорбции одинаково точно описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха. Определено, что максимальная сорбционная емкость по фенолу водорослями рода *Sargassum sp.* составила $82,1 \text{ мг/г}$, а водорослями рода *Chaetomorpha sp.* – $17,7 \text{ мг/г}$. В качестве основного способа адсорбции предлагается образование водородных связей между веществами, содержащимися в объеме биомассы водорослей и фенолом [59].

Две вышеназванные водоросли – Лессония чернеющая (*Lessonia nigrescens* Bory) и Макроцистис цельнолистный (*Macrocystis integrifolia* Bory)

в комбинации с бентонитом также использовались в качестве сорбционных материалов для извлечения 2-нитрофенола и 2-хлорфенола из модельных растворов в статических условиях с начальной концентрацией последних от 50 до 1000 мг/дм³. Природный бентонит модифицировали путем обработки бромидом гексадецилтриметиламмония и хлоридом бензилтриэтиламмония для увеличения сродства к органическим соединениям. Выявлено, что адсорбционная способность всех сорбционных материалов сильно зависит от pH раствора, тогда как равновесные анализы показали смешанный механизм согласно изотермам Ленгмюра и Фрейндлиха. Максимальная адсорбционная способность по 2-нитрофенолу колеблется от 18,64 мг/г до 97,37 мг/г, по 2-хлорфенолу – от 9,95 мг/г до 24,18 мг/г [63].

Исследована биосорбция фенола, 2-хлорфенола и 4-хлорфенола на биомассе *Sargassum muticum*, называемым японский проволочник. Это бурые водоросли, обычно от коричневого до желтоватого цвета, длиной до 10 м. Автотроф, использующий энергию солнечного света. Фотосинтез облегчается благодаря воздушным пузырькам, которые позволяют водорослям подниматься на поверхность. Инвазивная водоросль с высокой скоростью роста (до 10 см/сут. весной) [63]. Биомасса водоросли предварительно обрабатывалась CaCl₂ для улучшения сорбционной способности. Изотермы адсорбции при pH = 1 линеализировались с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха. Установлено, что максимальная сорбционная емкость сорбционного материала по фенолу составила 4,6 мг/г, по 2-хлорфенолу – 79,0 мг/г и 251 мг/г для 4-хлорфенола. Выявлено, что сорбционное равновесие наступает через 10 ч. Показано, что биосорбция фенольных соединений на биомассе *Sargassum muticum*, коррелирует с коэффициентами разделения фенолов октанолом и водой, что свидетельствует о гидрофобном взаимодействии, являющемся основной причиной адсорбции [64].

Исследовалось сорбционное удаление из модельных растворов водорастворимых соединений бензола, толуола, этилбензола и изомеров ксилола на биомассе водорослей *Macrocystis pyrifera* и *Ulva expansa* [65].

Ульва (*Ulva*) – род морских зеленых водорослей семейства Ульвовые (*Ulvaceae*). Распространены в морях умеренного и субтропического пояса. Многие виды съедобны, известны под названием «морской салат». Многоклеточное ярко-зеленое слоевище этой водоросли пластинчатое, может быть цельное, рассеченное либо ветвистое. Длина таллома составляет в среднем 0,3-1,5 м. В его

структуре различают два ряда тесно прилегающих друг к другу клеток. В основании слоевища имеются крупные клетки с ризоидами, образующие подошву, посредством которой водоросль прикрепляется к подводному субстрату.

В ходе проведения экспериментов выявлено, что изотермы адсорбции названных углеводов биомассой *Macrocystis pyrifera* и *Ulva expansa* более точно описываются моделью Sips [65], а кинетика процесса соответствует модели псевдо-второго порядка. Максимальные сорбционные емкости, вычисленные из уравнения Ленгмюра, по бензолу, толуолу, этилбензолу и изомерам ксилола биомассой *Macrocystis pyrifera* составили 2,242, 0,425, 5,231 и 2,14 ммоль/г, соответственно, биомассой *Ulva expansa* – 1,444, 0,344, 1,322 и 1,403, соответственно. Определено, что притяжение между изомерами ксилола и биомассой водорослей определяется π - π - и гидрофобными взаимодействиями [65].

Биомасса бурых (*Macrocystis pyrifera*), зеленых (*Ulva expansa*) и красных (*Acanthophora spicifera*) макроводорослей исследовалась в качестве биосорбентов для удаления бензола и толуола из модельных растворов [66].

Acanthophora spicifera – вид морских красных водорослей семейства *Rhodomelaceae*. Слоевище хрупкое, покрыто шипами, зеленовато-бурого, желтоватого или серовато-пурпурного цвета, скудно разветвленное или кустистое, 8-10 см высотой. Ветвление неправильно радиальное. Главные побеги до 2-3 мм в диаметре. Ветви цилиндрические по всему слоевищу, гладкие, без шипов. Веточки ограниченного роста многочисленные, с короткими шпоровидными шипами до 0,5 мм длиной, спирально расположены. Тетраспорангии тетраэдрически разделенные, до 50×80 мкм, образуются в шиповатых коротких раздутых веточках. Цистокарпы бокаловидные, 850 мкм длиной, 790-820 мкм в диаметре, развиваются в пазухах шипов. Растение прикрепляется к субстрату маленьким, неправильно лопастным диском. Растет на камнях и мертвых кораллах, покрытых песком и илом, на литорали и в верхней сублиторали, часто в литоральных лужах.

В ходе проведенных экспериментов определено, что наибольшую сорбционную емкость по бензолу (112 мг/г) и толуолу (28 мг/г) имеет бурая водоросль. Наименьшие сорбционные характеристики по названным углеводородам имеет красная водоросль. Модели Ленгмюра и Sips хорошо описывают изотермы адсорбции, а кинетика процесса описывается моделью псевдо-второго порядка.

Определено, что углеводороды адсорбируются на различных химических компонентах клеточных стенок морских водорослей под действием π - π - и гидрофобного взаимодействия [66].

Учитывая тот факт, что нативные высушенные водоросли имеют низкие механические характеристики, авторами работы [67] синтезирован композиционный сорбционный материал из биомассы водорослей *Macrocystis pyrifera*, хитозана и пектина. Полученный композит использовался для исследования адсорбции бензола, толуола и нафталина. Выявлено, что изотермы адсорбции хорошо описывались моделью адсорбции Sips, а уравнение псевдо-второго порядка наилучшим образом описывает кинетику процесса. Определено, что максимальная сорбционная емкость по бензолу, толуолу и нафталину композиционным сорбентом составила 58,68, 16,64 и 6,13 мг/г, соответственно [67].

Анализ литературных источников выявил несколько публикаций по использованию биомассы морских водорослей в качестве сорбционных материалов для извлечения канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). В частности, изучено удаление фенантрена мертвой биомассой водоросли *Sargassum hemiphyllum*. Время контактирования сорбата с сорбционным материалом составило 24 ч. Выявлено, что чем выше скорость перемешивающего устройства (50-250 об./мин) и температура (15-35 °C), тем выше скорость сорбции поллютанта. Исследование с различными начальными концентрациями фенантрена (50-1000 мкг/дм³) показало, что более высокий уровень последнего в водной среде приводит к высокой начальной скорости поглощения и большей сорбционной способности биомассы водорослей. Определено, что при начальной концентрации фенантрена 1000 мкг/дм³, сорбционная емкость составила 460 мкг/г. Найдено, что эффективность удаления поллютанта составляла 91,7-98,4% при варьировании параметров эксперимента. Выявлено, что значения pH в интервале pH = 2-11 практически не влияют на степень извлечения фенантрена. Кинетика адсорбции последнего более точно соответствует модели псевдо-второго порядка ($R^2 > 0,85$) [68].

Также исследована адсорбция фенантрена некоторыми видами фитопланктона, а также высшими морскими водорослями из рода *Porphyra* – морских красных водорослей из семейства бангиевых (*Bangiaceae*) [69]. Несколько видов последних в странах Востока и Великобритании употребляют в пищу. Произрастают в зоне приливов, обычно между верхней зоной приливов и зоной выплеска в

холодных водах океанов умеренного течения. Довольно крупные растения, слоевища которых могут достигать в длину одного метра, иногда более. Внешне эти водоросли выглядят как тонкие, широкие волнистые пластинки, в отдельных случаях со складками, могут быть с цельными или с рваными краями.

Выявлено, что исследуемые образцы микро- и макроводорослей сорбируют фенантрен, причем водоросли из рода порфира имеют наибольшую сорбционную емкость по фенантрону из числа исследованных. Показано, что изотермы адсорбции хорошо описываются моделью Фрейндлиха [69].

Водоросль из рода Ульвовых, *Ulva prolifera* – также называемая *Enteromorpha prolifera*, или ветвистый салат-латук, использовалась для извлечения ПАУ, таких как нафталин, фенантрен и бенз[а]пирен из модельных растворов [70].

Этот широко распространенный вид имеет трубчатую форму и может вырастать до нескольких метров в длину. Обычно его диаметр не превышает 5 мм, цвет варьируется от светло-зеленого до зеленого. Данный вид можно найти на береговой линии в результате выноса на берег моря после отливов, поскольку он плавает вдоль движения морской воды.

Результаты экспериментов показали, что равновесная адсорбционная способность по нафталину, фенантрону и бенз[а]пирену на детрите *U. prolifera* составила 1,27 мг/кг, 1,97 мг/кг, и 2,49 мг/кг, соответственно, при начальной концентрации ПАУ в морской воде 10 мкг/дм³ и дозировке сорбционного материала 4 г/дм³. Определено, что изотермы адсорбции названных ПАУ на биомассе *U. prolifera* наиболее адекватно описываются моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса в большей мере соответствует модели псевдо-второго порядка. Также выявлено, что увеличение солесодержания в морской воде привело к увеличению скорости удаления нафталина, в то время как солесодержание практически не влияла на удаление фенантрена и бенз[а]пирена [70].

В мировой литературе выявлено несколько статей по использованию биомассы водных макрофитов для извлечения углеводородов из водных сред. Так, в частности, исследовано удаление *n*-алканов, ПАУ и ионов тяжелых металлов из модельных вод с помощью трех высушенных морских водорослей – *Ulva intestinalis*, *Sargassum latifolium* и *Corallina officinalis*. Результаты проведенных исследований показали, что адсорбция *n*-алканов и ПАУ повысилась с увеличением времени контакта всех трех выбранных водорослей, при этом большая

степень удаления наблюдается через 15 дней. Выявлено, что сухая биомасса *S. latifolium* имела больший потенциал в качестве биоадсорбента, за ней следовал *C. ofcinalis*, а затем *U. intinalis*. Степень удаления *n*-алканов, тяжелых *n*-алканов и ПАУ биомассой *S. latifolium* составила 65,14%, 72,50% и 78,92%, соответственно, при начальной концентрации последних в воде 51,12 мкг/дм³, 74,7 мкг/дм³ и 21,16 мкг/дм³, соответственно [71].

Аналогичные эксперименты, описанные в работе [69], проводились по исследованию сорбционных способностей различных макроводорослей и некоторых видов фитопланктона по отношению к нонилфенолу. Показано, что водоросли из родов *Seaweed* и *Porphyra* эффективно сорбируют нонилфенол. Причем, эффективность адсорбции зависит от многих параметров, таких как соотношение химических элементов в составе водорослей, содержание -CH₂- групп и др. Также выявлена хорошая корреляция изотерм адсорбции с моделью Фрейндлиха [72].

Изучена биосорбция нонилфенола и бисфенола А (2,2-бис(4-гидроксифенил) пропана) с начальной концентрацией в морской воде 100 мкг/дм³ биомассой 6 морских высушенных водорослей. Выявлено, что наибольшей сорбционной эффективностью по названным соединениям обладает *Ulva pertusa*. Определено, что конечная концентрация нонилфенола и бисфенола А после 24-ч контактирования с высушенной биомассой водоросли составила 4,26 и 19,7 мкг/дм³, соответственно. Биосорбция с использованием живых образцов водоросли в таких же условиях способствует достижению конечных концентраций 3,08 и 13,39 мкг/дм³ за счет дополнительной фиторемедиации [73].

Следует отметить, что вопросам фиторемедиации различных органических загрязнений биомассой макро- и микроводорослей в воде морей и пресноводных водоемов посвящено множество работ отечественных и зарубежных исследователей, информация о которых объединена, в частности, в обзорных работах [74-80].

В частности, Воскобойниковым Г.М. с сотрудниками проведена работа по оценке вклада макроводорослей видов *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus*, *Fucus distichus*, *Fucus serratus*, *Saccharina latissima*, *Palmaria palmata* и *Ulvaria obscura* по фиторемедиации дизельного топлива в Кольском заливе Баренцева моря. Начальная концентрация дизельного топлива составляла 6,5 мг/дм³. Сделан вывод о том, что имеющиеся литоральные и сублиторальные заросли морских мак-

роводорослей Кольского залива являются важным элементом в процессе профилактической, повседневной очистки вод залива от НП. Авторами показано, что заросли бурых водорослей – важная составляющая системы репарации и гомеостаза в прибрежных морских экосистемах. Удивительной является выявленная у бурых, красных и зеленых макрофитов способность поглощать углеводороды, поскольку для них, в отличие от других автотрофов, использование в метаболизме альтернативных CO₂ источников углерода необычно. Эти сообщества обеспечивают постоянную очистку вод от НП, берут на себя основную нагрузку по ремедиации не только НП, растворенных в воде, но и «пленочных» форм углеводородов. В сублиторали ламинариевые водоросли, развиваясь на отдельных валунах, очищают воду от диспергированных НП. Эффективность участия ламинариевых водорослей в биоремедиации во многом обеспечивается большой площадью поверхности соприкосновения с НП и, возможно, высокой численностью на поверхности таллома эпифитных углеводородоокисляющих бактерий [81-83].

Однако, вопросы фиторемедиации углеводородов морскими и пресноводными макрофитами не входят в данную статью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в материале обзора обобщены данные литературных источников по использованию высушенной биомассы морских и пресноводных водорослей в качестве сорбционных материалов для извлечения нефти и продуктов ее переработки, а также других углеводородов, как с водной поверхности, так и из водной толщи. Кратко приведены данные по физиологии некоторых видов и родов макрогидробионтов и местам их произрастания в водной среде. Небольшое количество литературных данных об использовании макроводорослей в качестве сорбционных материалов для удаления углеводородов из водных сред, огромные объемы биомассы макрофитов, высокие темпы пополнения биомассы последних делают перспективными исследования по применению морских водорослей для извлечения нефти и продуктов ее переработки как с поверхности воды, так и из объема природных и сточных вод.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухутдинов А.А., Борознов Н.И., Петров Б.Г., Мухутдинова Т.З., Шаяхметов Д.К. Основы и менеджмент промышленной экологии. Казань: Магариф. 1998. 404 с.
2. Emenike E.C., Adeleke J., Iwuozor K.O., Ogunniyi S., Adeyanju C.A., Amusa V.T., Okoro H.K., Adeniyi A.G. Adsorption of crude oil from aqueous solution: A review. *J. Water Process Eng.* 2022. V. 50. P. 103330. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103330.
3. Oliveira L.M.T.M., Saleem J., Bazargan A., Duarte J.L.D.S., McKay G., Meili L. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents: A material and mechanistic approach. *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 407. P. 124842. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124842.
4. Sanatullova Z.T., Shaikhiev I.G. Investigation of the process of desorption of oil-saturated waste of feit production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012013.
5. Zainullin A.M., Truhan O.V., Khusainov R.M. Some features of the synthesis and coagulation treatment wastewater from the TNRS production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012033.
6. Zainullin A.M. Increasing the environmental safety of the initiating explosives production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012005.
7. Romanova S.M., Madyakina A.M. Utilization of Industrial Waste from Enterprises Producing Energy-Saturated Materials by the Chemical Method. *Russ. J. Gen. Chem.* 2022. V. 92. N 13. P. 3085–3092. DOI: 10.1134/s1070363222130096.
8. Romanova S.M., Madyakina A.M. Application of wastes productions of energy-saturated substances in receiving civil products. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012031.
9. Savelyev S.N., Savelyeva A.V., Dryakhlov V.O., Anamova R.R. Studying the extraction of heavy-metal ions from galvanic wastewater by reagent method. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012017.
10. Savelyev S.N., Savelyeva A.V., Fridland S.V., Anamova R.R. Integrated sulfide alkali wastewater treatment using spent galvanic solutions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012035.
11. Fazullin D.D., Fazullina L.I., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O. Composite Membranes with Cellulose Acetate Surface Layer for Water Treatment. *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2021. V. 12. N 5. P. 1229-1235. DOI: 10.1134/S2075113321050105.
12. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Dryakhlov V.O., Fazullina L.I., Shaikhiev, I.G., Golovnina E.A. Parameters of Household Wastewater Treatment Using Composite Membranes with a Surface Layer of Cellulose Acetate. *Membr. Membr. Technol.* 2021. V. 3. N 6. P. 419-425. DOI: 10.1134/S2517751621060032.
13. Ouyang D., Lei X., Zheng H. Recent Advances in Biomass-Based Materials for Oil Spill Cleanup. *Nanomaterials.* 2023. V. 13. N 3. P. 620. DOI: 10.3390/nano13030620.
14. Fouladi M., Kavousi Heidari M., Tavakoli O. Development of porous biodegradable sorbents for oil/water separation: a critical review. *J. Porous Mater.* 2023. V. 30. N 3. P. 1037-1053. DOI: 10.1007/s10934-022-01385-0.
15. Hoang A.T., Nguyen X.P., Duong X.Q., Huynh T.T. Sorbent-based devices for the removal of spilled oil from water: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. V. 28. N 11. P. 28876-28910. DOI: 10.1007/s11356-021-13775-z.

REFERENCES

1. Mukhutdinov A.A., Boroznov N.I., Petrov B.G., Mukhutdinova T.Z., Shayakhmetov D.K. Fundamentals and management of industrial ecology. Kazan: Magarif. 1998. 404 p. (in Russian).
2. Emenike E.C., Adeleke J., Iwuozor K.O., Ogunniyi S., Adeyanju C.A., Amusa V.T., Okoro H.K., Adeniyi A.G. Adsorption of crude oil from aqueous solution: A review. *J. Water Process Eng.* 2022. V. 50. P. 103330. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103330.
3. Oliveira L.M.T.M., Saleem J., Bazargan A., Duarte J.L.D.S., McKay G., Meili L. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents: A material and mechanistic approach. *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 407. P. 124842. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124842.
4. Sanatullova Z.T., Shaikhiev I.G. Investigation of the process of desorption of oil-saturated waste of feit production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012013.
5. Zainullin A.M., Truhan O.V., Khusainov R.M. Some features of the synthesis and coagulation treatment wastewater from the TNRS production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012033.
6. Zainullin A.M. Increasing the environmental safety of the initiating explosives production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012005.
7. Romanova S.M., Madyakina A.M. Utilization of Industrial Waste from Enterprises Producing Energy-Saturated Materials by the Chemical Method. *Russ. J. Gen. Chem.* 2022. V. 92. N 13. P. 3085–3092. DOI: 10.1134/s1070363222130096.
8. Romanova S.M., Madyakina A.M. Application of wastes productions of energy-saturated substances in receiving civil products. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012031.
9. Savelyev S.N., Savelyeva A.V., Dryakhlov V.O., Anamova R.R. Studying the extraction of heavy-metal ions from galvanic wastewater by reagent method. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012017.
10. Savelyev S.N., Savelyeva A.V., Fridland S.V., Anamova R.R. Integrated sulfide alkali wastewater treatment using spent galvanic solutions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 815. P. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012035.
11. Fazullin D.D., Fazullina L.I., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O. Composite Membranes with Cellulose Acetate Surface Layer for Water Treatment. *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2021. V. 12. N 5. P. 1229-1235. DOI: 10.1134/S2075113321050105.
12. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Dryakhlov V.O., Fazullina L.I., Shaikhiev, I.G., Golovnina E.A. Parameters of Household Wastewater Treatment Using Composite Membranes with a Surface Layer of Cellulose Acetate. *Membr. Membr. Technol.* 2021. V. 3. N 6. P. 419-425. DOI: 10.1134/S2517751621060032.
13. Ouyang D., Lei X., Zheng H. Recent Advances in Biomass-Based Materials for Oil Spill Cleanup. *Nanomaterials.* 2023. V. 13. N 3. P. 620. DOI: 10.3390/nano13030620.
14. Fouladi M., Kavousi Heidari M., Tavakoli O. Development of porous biodegradable sorbents for oil/water separation: a critical review. *J. Porous Mater.* 2023. V. 30. N 3. P. 1037-1053. DOI: 10.1007/s10934-022-01385-0.
15. Hoang A.T., Nguyen X.P., Duong X.Q., Huynh T.T. Sorbent-based devices for the removal of spilled oil from water: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. V. 28. N 11. P. 28876-28910. DOI: 10.1007/s11356-021-13775-z.

16. Zhang T., Li Z., Lü Y., Liu Y., Yang D., Li Q., Qiu F. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials. *Chin. J. Chem. Eng.* 2019. V. 27. N 6. P. 1282-1295. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.09.001.
17. Сироткина Е.Е., Новоселова Л.Ю. Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2005. Т. 13. № 3. С. 359-377.
18. Краснопорова С.А. Оценка эффективности сорбентов, применяемых для удаления нефти и нефтепродуктов. *Управление техносферой*. 2021. Т. 4. № 4. С. 413-423. DOI: 10.34828/UdSU.2021.83.79.007.
19. Турянский В.А. Использование растительных сорбентов при ликвидации нефтяных разливов. Сб. тр. конф. Наука молодых - наука будущего. Петрозаводск. 2023. С. 239-249.
20. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные сорбенты. М., Ижевск: Регул. и хаот. динамика. 2005. 268 с.
21. Li H., Liu L., Yang F. Oleophilic Polyurethane Foams for Oil Spill Cleanup. *Procedia Environ. Sci.* 2013. V. 18. P. 528-533. DOI: 10.1016/j.proenv.2013.04.071.
22. Li H., Liu L., Yang F. Hydrophobic modification of polyurethane foam for oil spill cleanup. *Mar. Pollut. Bull.* 2012. V. 64. N 8. P. 1648-1653. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.05.039.
23. Song S.F., Wang C., Fu Z.S., Fan Z.Q. Highly branched polyethylene used as sorbents for oil-spill cleanup and separation. *J. Polym. Sci. (Hoboken, NJ, U.S.)*. 2022. V. 60. N 15. P. 2418-2427. DOI: 10.1002/pol.20210950.
24. Shojaei N., Aminsharei F., Ahangar A.H. Application of hydrophobic polymers as solidifiers for oil spill cleanup. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 18. N 6. P. 1419-1424. DOI: 10.1007/s13762-020-02882-y.
25. Wei Q.F., Mather R.R., Fotheringham A.F., Yang R.D. Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery. *Mar. Pollut. Bull.* 2003. V. 46. N 6. P. 780-783. DOI: 10.1016/S0025-326X(03)00042-0.
26. Zhou X., Wang F., Ji Y., Chen W., Wei J. Fabrication of Hydrophilic and Hydrophobic Sites on Polypropylene Nonwoven for Oil Spill Cleanup: Two Dilemmas Affecting Oil Sorption. *Environ. Sci. Technol.* 2016. V. 50. N 7. P. 3860-3865. DOI: 10.1021/acs.est.5b06007.
27. Chau M.Q., Truong T.T., Hoang A.T., Le T.H. Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach. *Energ. Source. Part. A*. 2021. P. 1-14. DOI: 10.1080/15567036.2021.1928798.
28. Wang M., Tsai H.S., Zhang C., Wang C., Ho S.H. Effective purification of oily wastewater using lignocellulosic biomass: A review. *Chin. Chem. Lett.* 2022. V. 33. N 6. P. 2807-2816. DOI: 10.1016/j.ccllet.2021.11.060.
29. Kamel S., El-Sakhawy M. Using of agricultural residue in removing of oil spill. *Res. Rev. BioSci.* 2011. V. 5. N 2. P. 64-70.
30. Zamparas M., Tzivras D., Dracopoulos V., Ioannides T. Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review. *Molecules*. 2020. V. 25. N 19. P. 4522. DOI: 10.3390/molecules25194522.
31. Nguyen T.T., Loc N.D., Van Nam T. Modified methods of oil cleanup with cellulose-based adsorbents: a review. *Vietnam J. Hydrometeorol.* 2023. V. 14. P. 96-120. DOI: 10.36335/VNJHM.2023(14).96-120.
32. Akinyemi O.P. Recent Development on Treatment of Crude Oil Contaminated Water Using Agricultural Waste – A Review. *Int. J. Eng. Manag. Res.* 2020. V. 10. N 3. P. 89-92. DOI: 10.31033/ijemr.10.3.14.
33. Hubbe M.A., Rojas O.J., Fingas M., Gupta B.S. Cellulosic Substrates for Removal of Pollutants from Aqueous System: A Review. 3. Spilled Oil and Emulsified Organic Liquids.
16. Zhang T., Li Z., Lü Y., Liu Y., Yang D., Li Q., Qiu F. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials. *Chin. J. Chem. Eng.* 2019. V. 27. N 6. P. 1282-1295. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.09.001.
17. Sirotkina Ye.E., Novoselova L.Yu. Materials for adsorption purification of water from oil and petroleum products. *Khim. Interesakh Ustoichivogo Razvitiya*. 2005. V. 13. N 3. P. 359-377 (in Russian).
18. Krasnoporova S.A. Evaluation of the effectiveness of sorbents used to remove oil and petroleum products. *Upravl. Tekhnosf.* 2021. V. 4. N 4. P. 413-423 (in Russian). DOI: 10.34828/UdSU.2021.83.79.007.
19. Turyanskii V.A. The use of plant sorbents in oil spill response. Coll. of. abst. The science of the young is the science of the future. Petrozavodsk. 2023. P. 239-249.
20. Kamenshchikov F.A., Bogomolnii Ye.I. Oil sorbents. M., Izhevsk: Regul. Khaot. Dinamika. 2005. 268 p. (in Russian).
21. Li H., Liu L., Yang F. Oleophilic Polyurethane Foams for Oil Spill Cleanup. *Procedia Environ. Sci.* 2013. V. 18. P. 528-533. DOI: 10.1016/j.proenv.2013.04.071.
22. Li H., Liu L., Yang F. Hydrophobic modification of polyurethane foam for oil spill cleanup. *Mar. Pollut. Bull.* 2012. V. 64. N 8. P. 1648-1653. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.05.039.
23. Song S.F., Wang C., Fu Z.S., Fan Z.Q. Highly branched polyethylene used as sorbents for oil-spill cleanup and separation. *J. Polym. Sci. (Hoboken, NJ, U.S.)*. 2022. V. 60. N 15. P. 2418-2427. DOI: 10.1002/pol.20210950.
24. Shojaei N., Aminsharei F., Ahangar A.H. Application of hydrophobic polymers as solidifiers for oil spill cleanup. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 18. N 6. P. 1419-1424. DOI: 10.1007/s13762-020-02882-y.
25. Wei Q.F., Mather R.R., Fotheringham A.F., Yang R.D. Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery. *Mar. Pollut. Bull.* 2003. V. 46. N 6. P. 780-783. DOI: 10.1016/S0025-326X(03)00042-0.
26. Zhou X., Wang F., Ji Y., Chen W., Wei J. Fabrication of Hydrophilic and Hydrophobic Sites on Polypropylene Nonwoven for Oil Spill Cleanup: Two Dilemmas Affecting Oil Sorption. *Environ. Sci. Technol.* 2016. V. 50. N 7. P. 3860-3865. DOI: 10.1021/acs.est.5b06007.
27. Chau M.Q., Truong T.T., Hoang A.T., Le T.H. Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach. *Energ. Source. Part. A*. 2021. P. 1-14. DOI: 10.1080/15567036.2021.1928798.
28. Wang M., Tsai H.S., Zhang C., Wang C., Ho S.H. Effective purification of oily wastewater using lignocellulosic biomass: A review. *Chin. Chem. Lett.* 2022. V. 33. N 6. P. 2807-2816. DOI: 10.1016/j.ccllet.2021.11.060.
29. Kamel S., El-Sakhawy M. Using of agricultural residue in removing of oil spill. *Res. Rev. BioSci.* 2011. V. 5. N 2. P. 64-70.
30. Zamparas M., Tzivras D., Dracopoulos V., Ioannides T. Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review. *Molecules*. 2020. V. 25. N 19. P. 4522. DOI: 10.3390/molecules25194522.
31. Nguyen T.T., Loc N.D., Van Nam T. Modified methods of oil cleanup with cellulose-based adsorbents: a review. *Vietnam J. Hydrometeorol.* 2023. V. 14. P. 96-120. DOI: 10.36335/VNJHM.2023(14).96-120.
32. Akinyemi O.P. Recent Development on Treatment of Crude Oil Contaminated Water Using Agricultural Waste – A Review. *Int. J. Eng. Manag. Res.* 2020. V. 10. N 3. P. 89-92. DOI: 10.31033/ijemr.10.3.14.
33. Hubbe M.A., Rojas O.J., Fingas M., Gupta B.S. Cellulosic Substrates for Removal of Pollutants from Aqueous

- BioResources*. 2013. V. 8. N 2. P. 3038-3097. DOI: 10.15376/biores.8.2.3038-3097.
34. **El-Din G.A., Amer A.A., Malsh G., Hussein M.** Study on the use of banana peels for oil spill removal. *Alexandria Eng. J.* 2017. V. 57. N 3. P. 2061-2068. DOI: 10.1016/j.aej.2017.05.020.
35. **Wolok E., Barafi J., Joshi N., Girimonte R., Chakraborty S.** Study of bio-materials for removal of the oil spill. *Arabian J. Geosci.* 2020. V. 13. N 23. 1244. DOI: 10.1007/s12517-020-06244-3.
36. **Шайхиев И.Г., Хасаншина Э.М., Абдуллин И.Ш., Степанова С.В.** Влияние плазменной обработки льняной костры на удаления розливов девонской нефти с водной поверхности и гидрофобные характеристики. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2011. № 8. С. 165-171.
37. **Denisova T.R., Mavrin G.V., Sippel I.Y., Kuznetsova N.P., Shaikhiev I.G.** The influence of ash tree sawdust acid treatment on the removal of crude oil from water surfaces. *Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci.* 2016. V. 7. N 5. P. 1742-1750.
38. **Rudovica V., Rotter A., Gaudêncio S.P., Novoveská L., Akgül F., Akslen-Hoel L.K., Alexandrino D.A.M., Anne O., Arbidans L., Atanassova M., Beldowska M., Beldowski J., Bhatnagar A., Bikovens O., Bisters V., Carvalho M.F., Catalá T.S., Dubnika A., Erdogan A., Ferrans L., Haznedaroglu B.Z., Setyobudi R.H., Graca B., Grinfelde I., Hogland W., Ioannou E., Jani Y., Katarżyte M., Kikionis S., Klun K., Kotta J., Kriipsalu M., Labidi J., Bilela L.L., Martínez-Sanz M., Oliveira J., Ozola-Davidane R., Pilecka-Ulcugaceva J., Pospiskova K., Rebours C., Roussis V., López-Rubio A., Safarik I., Schmieder F., Stankevica K., Tamm T., Tasdemir D., Torres C., Varese G.C., Vincevica-Gaile Z., Zekker I., Burlakovs J.** Valorization of marine waste: use of industrial by-products and beach wrack towards the production of high added-value products. *Front. Mar. Sci.* 2021. V. 8. P. 723333. DOI: 10.3389/fmars.2021.723333.
39. **Raja K., Kadirvel V., Subramaniyan T.** Seaweeds, an aquatic plant-based protein for sustainable nutrition - A review. *Future Foods*. 2022. V. 5. P. 100142. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100142.
40. **Farghali M., Mohamed I.M., Osman A.I., Rooney D.W.** Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. *Environ. Chem. Lett.* 2023. V. 21. N 1. P. 97-152. DOI: 10.1007/s10311-022-01520-y.
41. **Lourenço-Lopes C., Fraga-Corral M., Jimenez-Lopez C., Pereira A.G., Garcia-Oliveira P., Carpena M., Prieto M.A., Simal-Gandara J.** Metabolites from macroalgae and its applications in the cosmetic industry: A circular economy approach. *Resources*. 2020. V. 9. N 9. P. 101. DOI: 10.3390/resources9090101.
42. **Lakshmi D.S., Sankaranarayanan S., Gajaria T.K., Li G., Kujawski W., Kujawa J., Navia R.** A Short review on the Valorization of Green Seaweeds and Ulvan: FEEDSTOCK for chemicals and biomaterials. *Biomolecules*. 2020. V. 10. N 7. P. 991. DOI: 10.3390/biom10070991.
43. **Thangavel P., Sridevi G.** Environmental Sustainability. Role of Green Technologies. India: Springer. 2015. 327 p. DOI: 10.1007/978-81-322-2056-5.
44. **Umamaheswari J., Rajamanickam R., Vilvanathan S., Shanthakumar S., Venkateswarlu K., Abinandan S., Megharaj M.** Removal of heavy metals and organic pollutants by marine microalgae. *Marine Organisms: A Solution to Environmental Pollution? Uses in Bioremediation and in Biorefinery*. Springer Internat. Publ. 2023. P. 29-64. DOI: 10.1007/978-3-031-17226-7_3.
- System: A Review. 3. Spilled Oil and Emulsified Organic Liquids. *BioResources*. 2013. V. 8. N 2. P. 3038-3097. DOI: 10.15376/biores.8.2.3038-3097.
34. **El-Din G.A., Amer A.A., Malsh G., Hussein M.** Study on the use of banana peels for oil spill removal. *Alexandria Eng. J.* 2017. V. 57. N 3. P. 2061-2068. DOI: 10.1016/j.aej.2017.05.020.
35. **Wolok E., Barafi J., Joshi N., Girimonte R., Chakraborty S.** Study of bio-materials for removal of the oil spill. *Arabian J. Geosci.* 2020. V. 13. N 23. 1244. DOI: 10.1007/s12517-020-06244-3.
36. **Shaikhiev I.G., Khasanshina E.M., Abdullin I.Sh., Stepanova S.V.** The influence of plasma treatment of flaxseeds on the removal of Devonian oil spills from the water surface and hydrophobic characteristics. *Vest. Kazan Technol. Univ.* 2011. N 8. P. 165-171 (in Russian).
37. **Denisova T.R., Mavrin G.V., Sippel I.Y., Kuznetsova N.P., Shaikhiev I.G.** The influence of ash tree sawdust acid treatment on the removal of crude oil from water surfaces. *Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci.* 2016. V. 7. N 5. P. 1742-1750.
38. **Rudovica V., Rotter A., Gaudêncio S.P., Novoveská L., Akgül F., Akslen-Hoel L.K., Alexandrino D.A.M., Anne O., Arbidans L., Atanassova M., Beldowska M., Beldowski J., Bhatnagar A., Bikovens O., Bisters V., Carvalho M.F., Catalá T.S., Dubnika A., Erdogan A., Ferrans L., Haznedaroglu B.Z., Setyobudi R.H., Graca B., Grinfelde I., Hogland W., Ioannou E., Jani Y., Katarżyte M., Kikionis S., Klun K., Kotta J., Kriipsalu M., Labidi J., Bilela L.L., Martínez-Sanz M., Oliveira J., Ozola-Davidane R., Pilecka-Ulcugaceva J., Pospiskova K., Rebours C., Roussis V., López-Rubio A., Safarik I., Schmieder F., Stankevica K., Tamm T., Tasdemir D., Torres C., Varese G.C., Vincevica-Gaile Z., Zekker I., Burlakovs J.** Valorization of marine waste: use of industrial by-products and beach wrack towards the production of high added-value products. *Front. Mar. Sci.* 2021. V. 8. P. 723333. DOI: 10.3389/fmars.2021.723333.
39. **Raja K., Kadirvel V., Subramaniyan T.** Seaweeds, an aquatic plant-based protein for sustainable nutrition - A review. *Future Foods*. 2022. V. 5. P. 100142. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100142.
40. **Farghali M., Mohamed I.M., Osman A.I., Rooney D.W.** Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. *Environ. Chem. Lett.* 2023. V. 21. N 1. P. 97-152. DOI: 10.1007/s10311-022-01520-y.
41. **Lourenço-Lopes C., Fraga-Corral M., Jimenez-Lopez C., Pereira A.G., Garcia-Oliveira P., Carpena M., Prieto M.A., Simal-Gandara J.** Metabolites from macroalgae and its applications in the cosmetic industry: A circular economy approach. *Resources*. 2020. V. 9. N 9. P. 101. DOI: 10.3390/resources9090101.
42. **Lakshmi D.S., Sankaranarayanan S., Gajaria T.K., Li G., Kujawski W., Kujawa J., Navia R.** A Short review on the Valorization of Green Seaweeds and Ulvan: FEEDSTOCK for chemicals and biomaterials. *Biomolecules*. 2020. V. 10. N 7. P. 991. DOI: 10.3390/biom10070991.
43. **Thangavel P., Sridevi G.** Environmental Sustainability. Role of Green Technologies. India: Springer. 2015. 327 p. DOI: 10.1007/978-81-322-2056-5.
44. **Umamaheswari J., Rajamanickam R., Vilvanathan S., Shanthakumar S., Venkateswarlu K., Abinandan S., Megharaj M.** Removal of heavy metals and organic pollutants by marine microalgae. *Marine Organisms: A Solution to Environmental Pollution? Uses in Bioremediation and in Biorefinery*. Springer Internat. Publ. 2023. P. 29-64. DOI: 10.1007/978-3-031-17226-7_3.

45. **Vahabisani A., An C.** Use of biomass-derived adsorbents for the removal of petroleum pollutants from water: a mini-review. *Environ. Syst. Res.* 2021. V. 10. N 1. P. 1-10. DOI: 10.1186/s40068-021-00229-1.
46. **Tripathy A., More R.D., Gupta S., Samuel J., Singh J., Prasad R.** Present and Future Prospect of Algae: A Potential Candidate for Sustainable Pollution Mitigation. *Open Biotechnol. J.* 2021. V. 15. N 1. P. 142-156. DOI: 10.2174/1874070702115010142.
47. **Ansar S.K.B., Kavusi E., Dehghanian Z., Pandey J., Lajayer A.B., Price G.W., Astatkie T.** Removal of organic and inorganic contaminants from the air, soil, and water by algae. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. V. 30. P. 116538-116566. DOI: 10.1007/s11356-022-21283-x.
48. **Wang S., Zhao S., Uzoejinwa B.B., Zheng A., Wang Q., Huang J., Abomohra A.E.F.** A state-of-the-art review on dual purpose seaweeds utilization for wastewater treatment and crude bio-oil production. *Energy Convers. Manag.* 2020. V. 222. P. 113253. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113253.
49. **Arumugam N., Chelliapan S., Kamyab H., Thirugnana S., Othman N., Nasri N.S.** Treatment of Wastewater Using Seaweed: A Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018. V. 15. N 12. P. 2851. DOI: 10.3390/ijerph15122851.
50. **Davis T.A., Volesky B., Mucci A.** A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Res.* 2003. V. 37. N 18. P. 4311-4330. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00293-8.
51. **Ben Jmaa S., Kallel A.** Assessment of Performance of Posidonia Oceanica (L.) as Biosorbent for Crude Oil-Spill Cleanup in Seawater. *BioMed Res. Int.* 2019. P. 6029654. DOI: 10.1155/2019/6029654.
52. **Restaino O.F., Giosafatto C.V.L., Mirpoor S.F., Cammarota M., Hejazi S., Mariniello L., Schiraldi C., Porta R.** Sustainable Exploitation of Posidonia Oceanica Sea Balls (Egagropili): A Review. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. N 8. P. 7301. DOI: 10.3390/ijms24087301.
53. **Ben Jmaa S., Kallel A.** Chemically Treated Seagrass Fibers as Biosorbent for Crude Oil Removal. *New Prosp. Environ. Geosci. Hydrogeosci.* 2022. P. 325-328. DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_73.
54. **Boleydei H., Mirghaffari N., Farhadian O.** Comparative study on adsorption of crude oil and spent engine oil from seawater and freshwater using algal biomass. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. N 21. P. 21024-21035. DOI: 10.1007/s11356-018-2281-y.
55. **Shi K., Li N., Qiao Y., Jiang Q., Xue J., Wang M., Huang G.** Efficiently remove of diesel oil pollutants in the marine environment by a novel biological-C14H32O3Si-Enteromorpha: Preparation, mechanism, and application. *J. Environ Chem. Eng.* 2022. V. 10. N 5. P. 108281. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108281.
56. **Ferreira R.M., Campista, A.L.D.M., Stapelfeldt D.M.A., Moreira M. de F.R.** Emulsified oil separation by bioadsorption: a sustainable proposal. *Environ. Technol.* 2022. V. 43. N 5. P. 696-708. DOI: 10.1080/09593330.2020.1801852.
57. **Navarro A.E., Portales R.F., Sun-Kou M.R., Llanos B.P.** Effect of pH on phenol biosorption by marine seaweeds. *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 156. N 1-3. P. 405-411. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.12.039.
58. **Navarro A.E., Lazo J.C., Cuizano N.A., Sun-Kou M.R., Llanos B.P.** Insights into Removal of Phenol from Aqueous Solutions by Low Cost Adsorbents: Clays Versus Algae. *Sep. Sci. Technol.* 2009. V. 44. N 11. P. 2491-2509. DOI: 10.1080/01496390903012197.
45. **Vahabisani A., An C.** Use of biomass-derived adsorbents for the removal of petroleum pollutants from water: a mini-review. *Environ. Syst. Res.* 2021. V. 10. N 1. P. 1-10. DOI: 10.1186/s40068-021-00229-1.
46. **Tripathy A., More R.D., Gupta S., Samuel J., Singh J., Prasad R.** Present and Future Prospect of Algae: A Potential Candidate for Sustainable Pollution Mitigation. *Open Biotechnol. J.* 2021. V. 15. N 1. P. 142-156. DOI: 10.2174/1874070702115010142.
47. **Ansar S.K.B., Kavusi E., Dehghanian Z., Pandey J., Lajayer A.B., Price G.W., Astatkie T.** Removal of organic and inorganic contaminants from the air, soil, and water by algae. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. V. 30. P. 116538-116566. DOI: 10.1007/s11356-022-21283-x.
48. **Wang S., Zhao S., Uzoejinwa B.B., Zheng A., Wang Q., Huang J., Abomohra A.E.F.** A state-of-the-art review on dual purpose seaweeds utilization for wastewater treatment and crude bio-oil production. *Energy Convers. Manag.* 2020. V. 222. P. 113253. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113253.
49. **Arumugam N., Chelliapan S., Kamyab H., Thirugnana S., Othman N., Nasri N.S.** Treatment of Wastewater Using Seaweed: A Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018. V. 15. N 12. P. 2851. DOI: 10.3390/ijerph15122851.
50. **Davis T.A., Volesky B., Mucci A.** A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Res.* 2003. V. 37. N 18. P. 4311-4330. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00293-8.
51. **Ben Jmaa S., Kallel A.** Assessment of Performance of Posidonia Oceanica (L.) as Biosorbent for Crude Oil-Spill Cleanup in Seawater. *BioMed Res. Int.* 2019. P. 6029654. DOI: 10.1155/2019/6029654.
52. **Restaino O.F., Giosafatto C.V.L., Mirpoor S.F., Cammarota M., Hejazi S., Mariniello L., Schiraldi C., Porta R.** Sustainable Exploitation of Posidonia Oceanica Sea Balls (Egagropili): A Review. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. N 8. P. 7301. DOI: 10.3390/ijms24087301.
53. **Ben Jmaa S., Kallel A.** Chemically Treated Seagrass Fibers as Biosorbent for Crude Oil Removal. *New Prosp. Environ. Geosci. Hydrogeosci.* 2022. P. 325-328. DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_73.
54. **Boleydei H., Mirghaffari N., Farhadian O.** Comparative study on adsorption of crude oil and spent engine oil from seawater and freshwater using algal biomass. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. N 21. P. 21024-21035. DOI: 10.1007/s11356-018-2281-y.
55. **Shi K., Li N., Qiao Y., Jiang Q., Xue J., Wang M., Huang G.** Efficiently remove of diesel oil pollutants in the marine environment by a novel biological-C14H32O3Si-Enteromorpha: Preparation, mechanism, and application. *J. Environ Chem. Eng.* 2022. V. 10. N 5. P. 108281. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108281.
56. **Ferreira R.M., Campista, A.L.D.M., Stapelfeldt D.M.A., Moreira M. de F.R.** Emulsified oil separation by bioadsorption: a sustainable proposal. *Environ. Technol.* 2022. V. 43. N 5. P. 696-708. DOI: 10.1080/09593330.2020.1801852.
57. **Navarro A.E., Portales R.F., Sun-Kou M.R., Llanos B.P.** Effect of pH on phenol biosorption by marine seaweeds. *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 156. N 1-3. P. 405-411. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.12.039.
58. **Navarro A.E., Lazo J.C., Cuizano N.A., Sun-Kou M.R., Llanos B.P.** Insights into Removal of Phenol from Aqueous Solutions by Low Cost Adsorbents: Clays Versus Algae. *Sep. Sci. Technol.* 2009. V. 44. N 11. P. 2491-2509. DOI: 10.1080/01496390903012197.

59. Navarro A.E., Hernandez-Vega A., Masud M.E., Roberson L.M., Diaz-Vázquez L.M. Bioremoval of Phenol from Aqueous Solutions Using Native Caribbean Seaweed. *Environments*. 2016. V. 4. N 1. P. 1-14. DOI: 10.3390/environments4010001.
60. Davis D., Simister R., Campbell S., Marston M., Bose S., McQueen-Mason S.J., Gomez L.D., Gallimore W.A., Tonon T. Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds *Sargassum fluitans* and *S. natans* (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. *Sci. Total Environ*. 2021. V. 762. 143134. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143134.
61. Saldarriaga-Hernandez S., Nájera-Martínez E.F., Martínez-Prado M.A., Melchor-Martínez E.M. Sargassum-based potential biosorbent to tackle pollution in aqueous ecosystems - An overview. *Case Stud. Chem. Environ. Eng*. 2020. V. 2. P. 100032. 1-5. DOI: 10.1016/j.csee.2020.100032.
62. Saldarriaga-Hernandez S., Hernandez-Vargas G., Iqbal H.M., Barcelo D., Parra-Saldívar R. Bioremediation potential of *Sargassum* sp. biomass to tackle pollution in coastal ecosystems: Circular economy approach. *Sci. Total Environ*. 2020. V. 715. P. 136978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136978.
63. Navarro A.E., Cuizano N.A., Lazo J.C., Sun-Kou M.R., Llanos B.P. Comparative study of the removal of phenolic compounds by biological and non-biological adsorbents. *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 164. N 2-3. P. 1439-1446. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.077.
64. Rubín E., Rodríguez P., Herrero R., Sastre de Vicente M.E. Biosorption of phenolic compounds by the brown alga *Sargassum muticum*. *J. Chem. Technol. Biotechnol*. 2006. V. 81. N 7. P. 1093-1099. DOI: 10.1002/jctb.1430.
65. Rodríguez-Hernandez M.C., Flores-Chaparro C.E., Rangel-Mendez J.R. Influence of dissolved organic matter and oil on the biosorption of BTEX by macroalgae in single and multi-solute systems. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2017. V. 24. N 80. P. 20922-20933. DOI: 10.1007/s11356-017-9672-3.
66. Flores-Chaparro C.E., Ruiz L.F.C., de la Torre M.C.A., Huerta-Díaz M.A., Rangel-Mendez J.R. Biosorption removal of benzene and toluene by three dried macroalgae at different ionic strength and temperatures: Algae biochemical composition and kinetics. *J. Environ. Manage*. 2017. V. 193. P. 126-135. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.005.
67. Flores-Chaparro C.E., Rodríguez-Hernandez M.C., Chazaro-Ruiz L.F., Alfaro-De la Torre M.C., Huerta-Díaz M.A., Rangel-Mendez J.R. Chitosan-macroalgae biocomposites as potential adsorbents of water-soluble hydrocarbons: Organic matter and ionic strength effects. *J. Cleaner Prod*. 2018. V. 197. P. 633-642. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.200.
68. Chung M.K., Tsui M.T., Cheung K.C., Tam N.F., Wong M.H. Removal of aqueous phenanthrene by brown seaweed *Sargassum hemiphyllum*: Sorption-kinetic and equilibrium studies. *Sep. Purif. Technol*. 2007. V. 54. N 3. P. 355-362. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.10.008.
69. Zhang D., Ran C., Yang Y., Ran Y. Biosorption of phenanthrene by pure algae and field-collected planktons and their fractions. *Chemosphere*. 2013. V. 93. N 1. P. 61-68. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.04.068.
70. Zhang C., Lu J., Wu J. Adsorptive removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by detritus of green tide algae deposited in coastal sediment. *Sci. Total Environ*. 2019. V. 670. P. 320-327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.296.
71. Akl F.M., Ahmed S.I., El-Sheekh M.M., Makhlof M.E. Bioremediation of n-alkanes, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals from wastewater using seaweeds. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2023. V. 30. N 47. P. 104814-104832. DOI: 10.1007/s11356-023-29549-8.
59. Navarro A.E., Hernandez-Vega A., Masud M.E., Roberson L.M., Diaz-Vázquez L.M. Bioremoval of Phenol from Aqueous Solutions Using Native Caribbean Seaweed. *Environments*. 2016. V. 4. N 1. P. 1-14. DOI: 10.3390/environments4010001.
60. Davis D., Simister R., Campbell S., Marston M., Bose S., McQueen-Mason S.J., Gomez L.D., Gallimore W.A., Tonon T. Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds *Sargassum fluitans* and *S. natans* (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. *Sci. Total Environ*. 2021. V. 762. P. 143134. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143134.
61. Saldarriaga-Hernandez S., Nájera-Martínez E.F., Martínez-Prado M.A., Melchor-Martínez E.M. Sargassum-based potential biosorbent to tackle pollution in aqueous ecosystems - An overview. *Case Stud. Chem. Environ. Eng*. 2020. V. 2. P. 100032. 1-5. DOI: 10.1016/j.csee.2020.100032.
62. Saldarriaga-Hernandez S., Hernandez-Vargas G., Iqbal H.M., Barcelo D., Parra-Saldívar R. Bioremediation potential of *Sargassum* sp. biomass to tackle pollution in coastal ecosystems: Circular economy approach. *Sci. Total Environ*. 2020. V. 715. P. 136978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136978.
63. Navarro A.E., Cuizano N.A., Lazo J.C., Sun-Kou M.R., Llanos B.P. Comparative study of the removal of phenolic compounds by biological and non-biological adsorbents. *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 164. N 2-3. P. 1439-1446. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.077.
64. Rubín E., Rodríguez P., Herrero R., Sastre de Vicente M.E. Biosorption of phenolic compounds by the brown alga *Sargassum muticum*. *J. Chem. Technol. Biotechnol*. 2006. V. 81. N 7. P. 1093-1099. DOI: 10.1002/jctb.1430.
65. Rodríguez-Hernandez M.C., Flores-Chaparro C.E., Rangel-Mendez J.R. Influence of dissolved organic matter and oil on the biosorption of BTEX by macroalgae in single and multi-solute systems. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2017. V. 24. N 80. P. 20922-20933. DOI: 10.1007/s11356-017-9672-3.
66. Flores-Chaparro C.E., Ruiz L.F.C., de la Torre M.C.A., Huerta-Díaz M.A., Rangel-Mendez J.R. Biosorption removal of benzene and toluene by three dried macroalgae at different ionic strength and temperatures: Algae biochemical composition and kinetics. *J. Environ. Manage*. 2017. V. 193. P. 126-135. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.005.
67. Flores-Chaparro C.E., Rodríguez-Hernandez M.C., Chazaro-Ruiz L.F., Alfaro-De la Torre M.C., Huerta-Díaz M.A., Rangel-Mendez J.R. Chitosan-macroalgae biocomposites as potential adsorbents of water-soluble hydrocarbons: Organic matter and ionic strength effects. *J. Cleaner Prod*. 2018. V. 197. P. 633-642. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.200.
68. Chung M.K., Tsui M.T., Cheung K.C., Tam N.F., Wong M.H. Removal of aqueous phenanthrene by brown seaweed *Sargassum hemiphyllum*: Sorption-kinetic and equilibrium studies. *Sep. Purif. Technol*. 2007. V. 54. N 3. P. 355-362. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.10.008.
69. Zhang D., Ran C., Yang Y., Ran Y. Biosorption of phenanthrene by pure algae and field-collected planktons and their fractions. *Chemosphere*. 2013. V. 93. N 1. P. 61-68. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.04.068.
70. Zhang C., Lu J., Wu J. Adsorptive removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by detritus of green tide algae deposited in coastal sediment. *Sci. Total Environ*. 2019. V. 670. P. 320-327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.296.
71. Akl F.M., Ahmed S.I., El-Sheekh M.M., Makhlof M.E. Bioremediation of n-alkanes, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals from wastewater using seaweeds. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2023. V. 30. N 47. P. 104814-104832. DOI: 10.1007/s11356-023-29549-8.

72. Zhang D., Ran Y., Cao X., Mao J., Cui J., Schmidt-Rohr K. Biosorption of nonylphenol by pure algae, field-collected planktons and their fractions. *Environ. Pollut.* 2015. V. 198. P. 61-69. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.12.020.
73. Zhang C., Lu J., Wu J. Enhanced removal of phenolic endocrine disrupting chemicals from coastal waters by intertidal macroalgae. *J. Hazard Mater.* 2021. V. 411. P. 125105. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125105.
74. Yavari S., Malakahmad A., Sapari N.B. A Review on Phytoremediation of Crude Oil Spills. *Water, Air, Soil Pollut.* 2015. V. 226. N 47. P. 1-18. DOI: 10.1007/s11270-015-2550-z.
75. Wei Z., Van Le Q., Peng W., Yang Y., Yang H., Gu H., Lam S.S., Sonne C. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *J. Hazard Mater.* 2021. V. 403. P. 123658. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123658.
76. Luqman M., Butt T.M., Tanvir A., Atiq M., Hussan M.Z.Y., Yaseen M. Phytoremediation of polluted water by tress: A review. *Afr. J. Agric. Res.* 2013. V. 8. N 17. P. 1591-1595. DOI: 10.5897/AJAR11.1111.
77. Mustafa H.M., Hayder G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Eng. J.* 2021. V. 12. N 1. P. 355-365. DOI: 10.1016/j.asej.2020.05.009.
78. Rezaia S., Ponraj M., Talaiekhazani A., Mohamad S.E., Din M.F.M., Taib S.M., Sabbagh F., Sairan F.M. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *J. Environ. Manag.* 2015. V. 163. P. 125-133. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.08.018.
79. Abdullah S.R.S., Al-Baldawi I.A., Almansoori A.F., Purwanti I.F., Al-Sbani N.H., Sharuddin S.S.N. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. *Chemosphere.* 2020. V. 247. P. 125932. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125932.
80. Ekperusi A.O., Sikoki F.D., Nwachukwu E.O. Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons in Polluted Waters Using Pistia Stratiotes: Gaps and Future Perspective. SPE Nigeria Annual Internat. Conf. and Exhibition. 2018. P. SPE-193527. P. 1-17. DOI:10.2118/193527-MS.
81. Voskoboinikov G.M., Ryzhik I.V., Salakhov D.O., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. Absorption and Conversion of Diesel Fuel by the Red Alga *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta): The Potential Role of Alga in Bioremediation of Sea Water. *Russ. J. Mar. Biol.* 2020. V. 46. N 2. P. 113-118. DOI: 10.1134/S1063074020020108.
82. Белый В.А., Свергузова С.В., Шайхiev И.Г., Сапронова Ж.А., Воронина Ю.С. Извлечение красителя метиленовый голубой из растворов биомассой опилок платана. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 139-145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.
83. Супрунчук В.Е. Создание и свойства биокomпозитных наночастиц на основе фукоидана как носителей фибринолитического фермента. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 87-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6680.
72. Zhang D., Ran Y., Cao X., Mao J., Cui J., Schmidt-Rohr K. Biosorption of nonylphenol by pure algae, field-collected planktons and their fractions. *Environ. Pollut.* 2015. V. 198. P. 61-69. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.12.020.
73. Zhang C., Lu J., Wu J. Enhanced removal of phenolic endocrine disrupting chemicals from coastal waters by intertidal macroalgae. *J. Hazard Mater.* 2021. V. 411. P. 125105. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125105.
74. Yavari S., Malakahmad A., Sapari N.B. A Review on Phytoremediation of Crude Oil Spills. *Water, Air, Soil Pollut.* 2015. V. 226. N 47. P. 1-18. DOI: 10.1007/s11270-015-2550-z.
75. Wei Z., Van Le Q., Peng W., Yang Y., Yang H., Gu H., Lam S.S., Sonne C. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *J. Hazard Mater.* 2021. V. 403. P. 123658. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123658.
76. Luqman M., Butt T.M., Tanvir A., Atiq M., Hussan M.Z.Y., Yaseen M. Phytoremediation of polluted water by tress: A review. *Afr. J. Agric. Res.* 2013. V. 8. N 17. P. 1591-1595. DOI: 10.5897/AJAR11.1111.
77. Mustafa H.M., Hayder G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Eng. J.* 2021. V. 12. N 1. P. 355-365. DOI: 10.1016/j.asej.2020.05.009.
78. Rezaia S., Ponraj M., Talaiekhazani A., Mohamad S.E., Din M.F.M., Taib S.M., Sabbagh F., Sairan F.M. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *J. Environ. Manag.* 2015. V. 163. P. 125-133. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.08.018.
79. Abdullah S.R.S., Al-Baldawi I.A., Almansoori A.F., Purwanti I.F., Al-Sbani N.H., Sharuddin S.S.N. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. *Chemosphere.* 2020. V. 247. P. 125932. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125932.
80. Ekperusi A.O., Sikoki F.D., Nwachukwu E.O. Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons in Polluted Waters Using Pistia Stratiotes: Gaps and Future Perspective. SPE Nigeria Annual Internat. Conf. and Exhibition. 2018. P. SPE-193527. P. 1-17. DOI:10.2118/193527-MS.
81. Voskoboinikov G.M., Ryzhik I.V., Salakhov D.O., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. Absorption and Conversion of Diesel Fuel by the Red Alga *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta): The Potential Role of Alga in Bioremediation of Sea Water. *Russ. J. Mar. Biol.* 2020. V. 46. N 2. P. 113-118. DOI: 10.1134/S1063074020020108.
82. Belyy V.A., Sverguзова S.V., Shaikhiev I.G., Sapronova Z.A., Voronina Y.S. Extraction of methylene blue dye from biomass solutions of sycamore sawdust. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 5. P. 139-145. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6757.
83. Suprunchuk V.E. Creation and properties of biocomposite nanoparticles based on fucoidan as carriers of fibrinolytic enzyme. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 5. P. 87-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20236605.6680.

Поступила в редакцию 06.03.2024
Принята к опубликованию 26.06.2024

Received 06.03.2024
Accepted 26.06.2024