

УДК 628.16.081.3:665.61

## Оценка эффективности органических материалов в качестве сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти в условиях арктической акватории

Ж. В. Васильева\*, А. С. Тришина

\*Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;  
e-mail: [vasilevazhv@mstu.edu.ru](mailto:vasilevazhv@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
11.12.2023;

получена  
после доработки  
07.03.2024;

принята к публикации  
12.03.2024

Ключевые слова:

сорбенты,  
сорбционные  
характеристики,  
ликвидация аварийных  
разливов нефти,  
Арктический регион,  
мох сфагнум, фукус  
пузырчатый, торф

Результаты сравнительной оценки сорбционных характеристик регионального природного сырья органического происхождения (мха сфагнума, фукуса пузырчатого, композита на их основе, торфа) представлены в сравнении с синтетическим сорбентом OilSorb, используемым в практике аварийно-спасательных подразделений для ликвидации аварийных разливов нефти. Экспериментальные данные в отношении потенциальных загрязнителей акватории Баренцева моря (нефти сорта ARCO, судового дизельного топлива) и показатели водоемкости сорбентов получены для стандартных условий при температуре 21–23 °С (согласно ГОСТ 33627-2015) и температуре 10–12 °С, характерной для летнего периода на Кольском полуострове. Оценка сорбционных характеристик исследуемых материалов проведена для системы "морская вода – нефтепродукт", моделирующей реальный разлив нефти в морской акватории. Испытания в модельной системе, имитирующей реальные условия, демонстрируют существенные изменения эффективности использования сорбционных материалов, показанной ими при стандартных условиях. В ходе исследования установлена динамика распределения сорбированных нефтепродуктов и воды в рассматриваемых материалах, а также остаточных нефтепродуктов – в воде систем "морская вода – нефть ARCO" и "морская вода – дизельное топливо" при различном времени экспозиции. В течение времени экспозиции 30, 60, 90 мин в условиях системы, моделирующей реальный разлив нефти в акватории, наиболее эффективными и устойчивыми во времени показателями сорбции нефтепродуктов обладает материал на основе мха сфагнума.

Для цитирования

Васильева Ж. В. и др. Оценка эффективности органических материалов в качестве сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти в условиях арктической акватории. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 2. С. 142–157. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-142-157>.

## Assessing the effectiveness of local organic materials as sorbents for oil spill response in Arctic waters

Zhanna V. Vasileva\*, Anastasia S. Trishina

\*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;  
e-mail: [vasilevazhv@mstu.edu.ru](mailto:vasilevazhv@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

Article info

Received  
11.12.2023;

received  
in revised  
07.03.2024;

accepted  
12.03.2024

Key words:

sorbents, sorption  
characteristics,  
oil spill response,  
Arctic region,  
sphagnum moss,  
fucus algae, peat

Abstract

The paper presents the results of a comparative assessment of the sorption characteristics of regional natural raw materials of organic origin: sphagnum moss (*Sphagnum palustre* L.), fucus algae (*Fucus vesiculosus*), a composite based on them and peat in comparison with the synthetic sorbent OilSorb used in the practice of emergency rescue units to eliminate accidental oil spills. Experimental data have been obtained on potential pollutants in the Barents Sea (oil ARCO and diesel fuel) and the water capacity of sorbents for standard conditions at temperatures of 21–23 °C according to GOST 33627-2015 and in the temperature range of 10–12 °C typical for the summer period on the Kola Peninsula. The sorption characteristics of the materials under study have been evaluated in the "sea water – petroleum product" system, which simulates a real oil spill in the marine area. Tests in a model system simulating real conditions demonstrate significant changes in the efficiency of using sorption materials shown by them under standard conditions. The study has established the dynamics of the distribution of sorbed oil products and water in the materials under consideration, as well as residual oil products in the water of the "sea water – ARCO oil" and "sea water – diesel fuel" systems at different exposure times. During an exposure time of 30, 60, 90 minutes under the conditions of a system simulating a real oil spill in the water area, the material based on sphagnum moss has the most effective and time-stable indicators of sorption of oil products.

For citation

Vasileva, Z. V. et al. 2024. Assessing the effectiveness of local organic materials as sorbents for oil spill response in Arctic waters. *Vestnik of MSTU*, 27(2), pp. 142–157. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-142-157>.

## Введение

Экосистемы Арктического региона характеризуются высокой восприимчивостью к антропогенному влиянию, сложным и хрупким экологическим балансом, медленными процессами естественного восстановления.

Основным источником риска для окружающей среды в Арктике является транспортировка нефти и нефтепродуктов (НП), которая несет потенциальную угрозу критического ущерба уязвимой окружающей среде в случае чрезвычайных ситуаций. В настоящее время наблюдается тенденция к наращиванию грузооборота и увеличению объемов транспортировки нефти по заполярным акваториям (Транспортная стратегия РФ на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г.; государственная программа РФ "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации"; федеральный проект "Северный морской путь" в составе Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г.; план развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 г.). Объем морских грузоперевозок по Северному морскому пути (СМП) к концу 2024 г. должен достичь 80 млн т, а после 2035 г. планируется его увеличение до 160 млн т. Рост интенсивности судоходства, расширение сети судоходных маршрутов круглогодичного режима плавания и решение сопутствующих задач по обеспечению развития СМП также увеличивают риск, связанный с аварийными разливами транспортируемой нефти и нефтепродуктов.

Одним из важных факторов успешного устранения разливов нефти является скорость удаления нефтепродуктов с поверхности воды. В качестве перспективного метода решения указанной задачи следует отметить использование природных сорбентов ввиду их эффективности, низкой стоимости, доступности, биodeградебельности. В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям возможности применения органических материалов природного происхождения в качестве сорбентов (*Sidik et al., 2012; Razavi et al., 2015; Choi et al., 1992; Kobayashi et al., 1977; Kudaibergenov et al., 2012; Zhao et al., 2013; Li et al., 2013*).

Природными материалами, рассматриваемыми в качестве сорбентов нефти, являются крупнотоннажные отходы промышленности и сельского хозяйства. Отходы сельского хозяйства штатов юго-восточной Америки [волокна молочая *Asclepias*, волокна гибискуса конопляного (кенаф), хлопок] показывают более высокие результаты в отношении сорбции нефти, чем традиционные синтетические сорбенты (*Choi et al., 1992*). В ходе исследований выявлены сорбирующие качества волокна хлопкового дерева (капок), что обуславливает возможность их использования в районах юго-восточной и центральной Азии (*Kobayashi et al., 1977; Lim et al., 2007; Huang et al., 2006*). Доступным природным материалом для этого региона являются также отходы масличной пальмы (лигноцеллюлозная биомасса) и отходы кокосовой пальмы (кокосовая шелуха) (*Sidik et al., 2012; Khan et al., 2004; Ifelebuegu et al., 2015*), а также волокна камыша (*Khan et al., 2004; Ribeiro et al., 2003*). В регионах Азии в качестве сырья для сорбентов рассматривают отходы лесного хозяйства (волокна пихты *Abies sachalinensis Fr. Schm*) (*Inagaki et al., 2002; Иванов и др., 2011*). Характерными природными материалами для района Персидского залива (*Razavi et al., 2015*), юго-восточной Азии (*Khan et al., 2004*), а также регионов Прикаспия (*Kudaibergenov et al., 2012*) являются отходы рисоперерабатывающей промышленности (шелуха белого и черного риса). Применение отходов сахарного тростника характерно для территорий с концентрацией соответствующего производства – южной Америки (*Díaz et al., 2022; Guilharduci et al., 2017*) и Азии (*Behnood et al., 2016*). Доступными природными материалами Балтийского и Скандинавского регионов являются местная шерсть, мох, солома, торф и отход при добыче торфа – волокна пушицы (*Paulauskienė et al., 2015; Suni et al., 2005*).

В различных регионах мира в качестве сорбентов нефти и нефтепродуктов для ликвидации аварийных разливов используют кору и волокно древесины (*Inagaki et al., 2002; Saito et al., 2001; Teas et al., 2001; Haussard et al., 2003; Banerjee et al., 2006; Семенович и др., 2008*), солому злаковых (*Ibrahim et al., 2010; Tijani et al., 2016; Witka-Jeżewska et al., 2003*), а также местные разновидности торфа (*Paulauskienė et al., 2015; Ribeiro et al., 2003; Liu et al., 2022*). Менее распространены и изучены такие материалы, как стебли кукурузы (*Husseien et al., 2015*), люффа (*Annunciado et al., 2005*), апельсиновая цедра (*El Gheriany et al., 2020*) и др.

Поиск возможностей использования природных сорбционных материалов на основе органического сырья для ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН) является актуальным направлением исследований, реализуемых в различных регионах мира.

Организация регионального производства нефтяных сорбентов из местного сырья позволяет обеспечить доступность эффективных сорбционных материалов и существенно снизить затраты на транспортировку, так как ввиду низкой объемной массы нефтяных сорбентов доставка их на дальние расстояния экономически невыгодна.

Следует отметить, что профессиональные аварийно-спасательные формирования (ПАСФ) и другие аварийно-спасательные подразделения регионов в соответствии с постановлением Правительства РФ № 2124 обязаны быть оснащены достаточными количествами сорбента. Согласно действующему законодательству,

организации, осуществляющие оборот, хранение, использование, перевалку нефтепродуктов, должны иметь на балансе определенное количество сорбента для первоначальных действий по ликвидации аварийного разлива. К таким организациям относятся предприятия, занимающиеся морехозяйственной деятельностью в арктической акватории (в том числе в акватории Кольского залива, Кандалакшского залива, Двинской губы и др.), а также иные предприятия, осуществляющие перевалку, хранение, использование НП. Предприятия, не относящиеся к вышеперечисленным категориям, согласно внутренним регламентирующим документам, организуют мобильный пост ЛАРН, оснащенный установленным запасом сорбционного материала.

Таким образом, поиск потенциально эффективных сорбционных материалов на основе регионального сырья, их изучение и последующее производство не только снижают риски, связанные с нефтяными разливами, но и имеют экономическую значимость вследствие обоснованного сформированного спроса на конкурентоспособный сорбционный материал для реализации природоохранных мероприятий на предприятиях регионов, использующих НП, а также осуществляющих добычу, переработку, утилизацию обработанных нефтепродуктов.

Целью настоящего исследования являлась оценка возможности применения региональных природных материалов органического происхождения в качестве сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в условиях Арктического региона.

### Материалы и методы

В качестве сорбентов нефти и нефтепродуктов в настоящей работе были исследованы образцы природного сырья Кольского полуострова органического происхождения: мох сфагнум *Sphagnum palustre* L., торф (месторождение Катка-2, Мурманская область), фукус пузырчатый *Fucus vesiculosus*, композит сорбционных материалов, состоящий из мха сфагнума (50 %) и фукуса пузырчатого (50 %). Для сравнения был использован коммерческий синтетический сорбент OilSorb (Absorbent Servis OÜ, Эстония) с заявленной нефтеемкостью 10 г/г. Синтетический сорбент OilSorb выбран по рекомендации представителей ПАСФ как материал, имеющий высокую эффективность сорбции, но при этом низкую технологическую готовность к использованию при ЛАРН в арктических условиях (высокая дисперсность, легучесть, неудобство использования при ветровых нагрузках и др.).

Подготовка природных сорбционных материалов заключалась в высушивании в естественных условиях (влажность окружающего воздуха 60 %, температура  $20 \pm 2$  °C) с последующим измельчением образцов до крупности частиц  $1 \pm 0,5$  см. Композит "мох – фукус" был изготовлен путем смешения равных долей измельченного мха сфагнума *Sphagnum palustre* L. и водорослей – фукуса пузырчатого *Fucus vesiculosus*.

В отношении оценки сорбционных свойств материалов необходимо отметить следующее. На практике применяют различные способы определения сорбционной емкости (ГОСТ 33622-2015; ГОСТ 33627-2015; ТУ 214-10942238-03-95) (Нифталиев и др., 2019; Телушкина и др., 2013; Цомбуева, 2014; Денисова и др., 2015), заключающиеся в экспозиции сорбента в объеме нефти или нефтепродукта и последующем вычислении массы сорбата, удерживаемого 1 г сорбента. Сорбент для удобства извлечения удерживается медной сеткой диаметром 30–80 мм (ТУ 214-10942238-03-95) (Каменищиков и др., 2005); хлопчатобумажной тканью (Телушкина и др., 2013); сетчатой корзинкой без требований к размеру отверстий (ГОСТ 33627-2015) (Денисова и др., 2015); фильтрующими секциями (Евстигнеев и др., 2016), в некоторых описанных случаях сорбент размещался на ровную поверхность и искусственно загрязнялся до полного насыщения (Цомбуева, 2014). К времени экспозиции либо не установлено требований (Евстигнеев и др., 2016; Цомбуева, 2014), либо указаны диапазоны в промежутках от 1 до 30 мин (ТУ 214-10942238-03-95, ГОСТ 33627-2015) (Телушкина и др., 2013; Денисова и др., 2015) и от 30 до 120 мин (ГОСТ 33622-2015). Время стекания нефти также учитывается лишь при использовании некоторых способов, в частности, описанных в ТУ 214-10942238-03-95, ГОСТ 33627-2015, ГОСТ 33622-2015. В то же время при недостаточном времени стекания нефтепродуктов перед взвешиванием или в случае неудачной конструкции удерживающего сорбент устройства, которое не обеспечивает свободное стекание, результат будет завышенным (Лим и др., 2018).

Необходимо отметить иные факторы, значительно влияющие на результаты измерений. Так, при недостаточном времени контакта "сорбент – сорбат" результат может быть заниженным вследствие неполного проникновения нефтепродуктов в поры сорбента. Небольшой размер испытываемой навески сорбента для вязких нефтепродуктов также дает искаженный результат (Лим и др., 2018). Значительное влияние на сорбцию оказывает температура окружающей среды (Левченко, 2008). Для оценки характеристик сорбционных материалов важным условием является определение их водоемкости ввиду того, что поглощение воды и ее паров материалом приводит к уменьшению его нефтеемкости, а также способности удерживаться на поверхности воды при проведении ликвидации аварийных разливов нефти. Поэтому результативными в разделении водонефтяной эмульсии, как правило, являются материалы, обладающие низкой водоемкостью, которая также обеспечивает плавучесть сорбента.

Характеристики сорбирующих материалов (нефтеемкость и водоемкость) оценивались согласно ГОСТ 33627-2015 с учетом всех факторов при определении показателей. Навеска сорбента массой  $4 \pm 0,01$  г с помощью сетчатой корзинки помещалась в слой испытуемого нефтепродукта. Время экспозиции составляло

15, 30, 60, 90 мин. По истечении контактного периода корзинку с адсорбентом вынимали, чтобы дать возможность стечь не закрепленной в структуре сорбента жидкости. Время стекания составляло  $30 \pm 3$  с для оценки водоемкости и  $2 \text{ мин} \pm 3 \text{ с}$  – для оценки нефтеемкости сорбционных материалов; затем определялась масса сорбента с поглощенным им сорбатом. Испытания проводились в трех повторностях.

Оценка производилась в отношении потенциальных загрязнителей арктической акватории: дизельного топлива судового маловязкого (плотность  $850 \text{ кг/м}^3$ ) и нефти сорта ARCO (плотность  $906 \text{ кг/м}^3$ ). Выбор данных НП в качестве загрязнителей обусловлен наиболее вероятными их разливами при бункеровке судов и перевалке арктической нефти в акватории Кольского залива. Анализ водоемкости сорбентов осуществлялся с использованием проб воды Кольского залива.

Исследование проводилось в рамках двух температурных режимов: 1) в стандартных условиях при температуре  $21\text{--}23 \text{ }^\circ\text{C}$  (согласно ГОСТ 33627-2015); 2) при температуре  $10\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$ , характерной для летнего периода на Кольском полуострове (по данным средних многолетних значений температуры воздуха) (Яковлев, 1972).

Сорбционные материалы также оценивались в условиях, моделирующих реальный разлив нефтепродукта на поверхность акватории Кольского залива. Исследования сорбционных характеристик в системе "морская вода – нефтепродукт" проводили следующим образом: стеклянную емкость заполняли морской водой (температура  $10\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и устанавливали сетку (рис. 1). Поверхность воды покрывали  $7,0 \text{ мл}$  нефти/дизельного топлива (температура  $10\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с целью полного покрытия площади поперечного сечения емкости пленкой нефтепродукта толщиной  $1 \text{ мм}$ ; после чего по поверхности нефтяного пятна распределялся предварительно взвешенный сорбент массой  $1,0 \text{ г}$ ; время экспозиции составляло 30, 60, 90 мин. Сорбционный материал извлекался с помощью металлической сетки, взвешивался после стекания нефтепродуктов в течение  $2 \text{ мин} \pm 3 \text{ с}$ . Количество нефтепродуктов, оставшееся в воде, определялось согласно методике ПНД Ф 14.1: 2.116-97; количество поглощенного нефтепродукта и воды рассчитывалось в соответствии с общим балансом массы; каждое испытание проводили в трех повторностях.

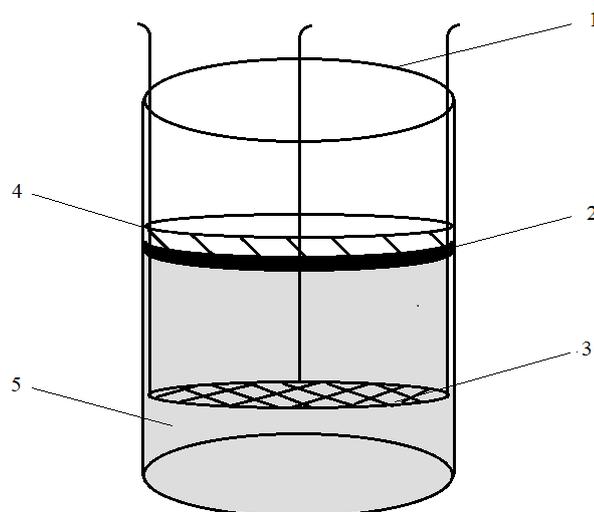


Рис. 1. Модель для анализа сорбционных характеристик в системе "морская вода – нефтепродукт":

1 – лабораторный стакан; 2 – нефтепродукт; 3 – металлическая сетка;  
4 – сорбционный материал; 5 – морская вода

Fig. 1. Model for analyzing sorption in the "sea water – oil product" system:

1 – glass container; 2 – petroleum product; 3 – metal mesh; 4 – sorption material; 5 – sea water

## Результаты и обсуждение

### Результаты исследования нефтеемкости сорбционных материалов

Сорбционная емкость – максимальное количество сорбата, которое может быть поглощено и удержано сорбентом. Согласно ГОСТ 33627-2015 сорбционная емкость по отношению к нефтепродуктам (нефтеемкость) – максимально возможная адсорбционная способность материала полностью насытиться НП при определенном времени насыщения. На величину этого показателя оказывают действие температура окружающей среды, тип нефтепродукта и другие факторы, которые потенциально могут изменить эффективность проводимых работ по ЛАРН. Температура является одним из важных факторов ликвидации АРН в условиях северных регионов. В данном эксперименте необходимо было оценить, каким образом влияет на сорбционные способности материалов снижение температуры от диапазона  $21\text{--}23 \text{ }^\circ\text{C}$ , при котором проводится предписанная ГОСТ 33627-2015 оценка, до диапазона  $10\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$ , свойственного для летнего периода на Кольском полуострове.

Результаты сравнительной оценки характеристик нефтеемкости природных органических и синтетического сорбционных материалов в условиях температурных режимов 10–12 и 21–23 °С (согласно ГОСТ 33627-2015 время экспозиции составляло 15 мин) представлены на рис. 2.

В ходе проведенных исследований установлено, что изменение температуры от 21–23 °С, моделирующей стандартные условия испытаний сорбентов по ГОСТу, до температуры 10–12 °С, характерной для летнего периода на Кольском полуострове, незначительно влияет на нефтеемкость исследованных сорбционных материалов. Несколько большая сорбционная емкость материалов была отмечена при температуре 10–12 °С в отношении дизельного топлива в сравнении с аналогичными показателями при испытаниях в предписанной стандартом более высокой лабораторной температуре 21–23 °С (рис. 2, *а*). Этот факт объясняется повышением вязкости нефтепродукта при понижении температуры окружающей среды, следовательно, большей способностью удерживаться на поверхности сорбента. Следует отметить незначительную разницу значений показателя нефтеемкости, в целом укладывающуюся в пределы стандартной ошибки опыта, при испытаниях в исследованных диапазонах температуры. Возможно, более низкие температурные значения, свойственные условиям окружающей среды Арктической зоны, могут оказывать более значимое воздействие на нефтеемкость исследуемых сорбентов, что может являться одной из исследовательских задач дальнейших экспериментов в данной области.

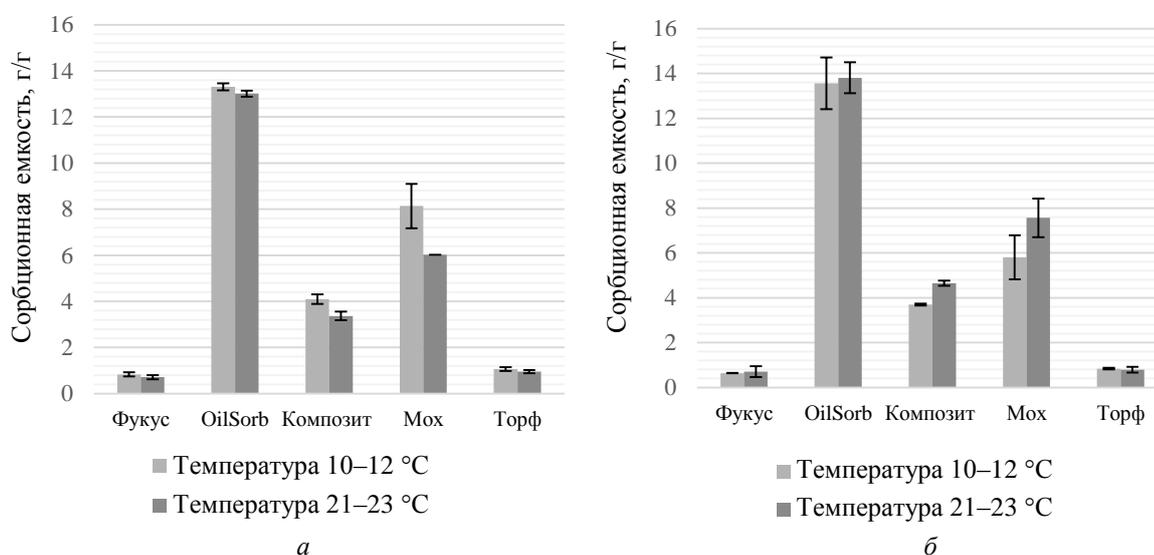


Рис. 2. Сорбционная емкость материалов в зависимости от температуры окружающей среды: *а* – дизельное топливо; *б* – нефть  
Fig. 2. Sorption capacity of sorbents depending on the ambient temperature: *а* – diesel fuel; *б* – oil

В отношении сорбции нефти марки ARKO в условиях более низких температур природные сорбенты по сравнению со стандартными условиями показали несколько меньшую нефтеемкость (рис. 2, *б*), значения которой находились в пределах стандартной ошибки опыта, что свидетельствует об отсутствии значимого влияния выбранного диапазона температуры на сорбцию этого типа нефтепродуктов.

При сравнении показателей нефтеемкости природных сорбционных материалов с коммерческим образцом при температуре 21–23 °С в отношении дизельного топлива (рис. 2, *а*) отмечено, что сорбционные материалы на основе мха сфагнума, композит "мох – фукус", торф, фукус пузырчатый характеризуются меньшей сорбционной способностью, чем OilSorb, на 53,7; 74,0; 92,6 и 94,5 % соответственно. Для нефти марки ARCO (рис. 2, *б*) в этих же условиях сорбционная емкость мха сфагнума, композита "мох – фукус", торфа и фукуса буроого ниже на 45,2; 66,4; 94,4 и 94,3 %, чем исследуемого синтетического сорбента.

Результаты исследования сорбционной емкости материалов при температуре 10–12 °С показывают аналогичные результаты: наибольшей сорбционной емкостью обладает коммерческий сорбент OilSorb (дизельное топливо –  $13,3 \pm 0,15$  г/г, нефть ARCO –  $13,6 \pm 1,15$  г/г); высокой нефтеемкостью обладает мох сфагнум (дизельное топливо –  $8,1 \pm 0,96$  г/г, нефть ARCO –  $5,8 \pm 0,98$  г/г); в меньшей степени в этих условиях нефтесорбирующими свойствами обладают торф (дизельное топливо –  $1,1 \pm 0,08$  г/г, нефть ARCO –  $0,8 \pm 0,03$  г/г) и композит "мох – фукус" (дизельное топливо –  $4,1 \pm 0,21$  г/г, нефть ARCO –  $3,7 \pm 0,04$  г/г). Наименьшие показатели нефтеемкости были отмечены для фукуса (дизельное топливо –  $0,8 \pm 0,09$  г/г, нефть ARCO –  $0,6 \pm 0,003$  г/г). Фукус за счет менее развитой поверхности и практически полного отсутствия пористой структуры не может рассматриваться в качестве сорбционного материала без возможной дополнительной обработки. Фукус пузырчатый был выбран в качестве составной части композита "мох – фукус"

с учетом его гидрофобных свойств и плавучести. Низкие показатели нефтеемкости данного композита, очевидно, обусловлены присутствием в составе фукуса, что не позволило композиту "мох – фукус" достичь значений, близких к максимальной сорбционной емкости мха сфагнума.

Полученные результаты испытаний свидетельствует о достаточно высоком потенциале использования сорбирующего материала на основе мха сфагнума *Sphagnum palustre* L. для ликвидации аварийных разливов дизельного топлива и нефти сорта ARCO в Арктическом регионе.

#### Результаты исследования зависимости нефтеемкости сорбционных материалов от времени контакта с сорбатом

Динамику изменения нефтеемкости при различном времени экспозиции в отношении нефти и дизельного топлива оценивали с учетом времени экспозиции 15, 30, 60, 90 мин (рис. 3, а и б).

При температуре 10–12 °С показатели нефтеемкости по отношению к нефти сорта ARCO для материала OilSorb несколько возрастали с 15 по 30 мин экспозиции, а затем снижались, показывая незначительную десорбцию поглощенного вещества обратно в окружающую среду. Сорбционные материалы на основе мха сфагнума, его композит, материалы на основе торфа и фукуса в течение всех периодов экспозиции показали незначительные колебания нефтеемкости в условиях температуры 10–12 °С. Нефтеемкость этих материалов практически не менялась от времени сорбции. Сорбенты из этих видов природного сырья могут находиться в контакте с пленками нефтепродуктов при ликвидации аварийных разливов нефти в течение исследованного диапазона времени, не возвращая в окружающую среду сорбированный нефтепродукт.

В условиях температуры 21–23 °С (рис. 3, б) сорбция нефти синтетическим сорбентом практически не меняется. Сорбционные материалы на основе мха сфагнума, композит "мох – фукус", торф, фукус пузырчатый в данном диапазоне значений температуры показали незначительную динамику, изменения которой в целом находятся также в пределах стандартной ошибки опыта, следовательно, сорбционная емкость этих материалов в отношении нефти ARCO не зависит от количества времени, проведенного в сорбате (рис. 3, а и б) в условиях стандартного эксперимента.

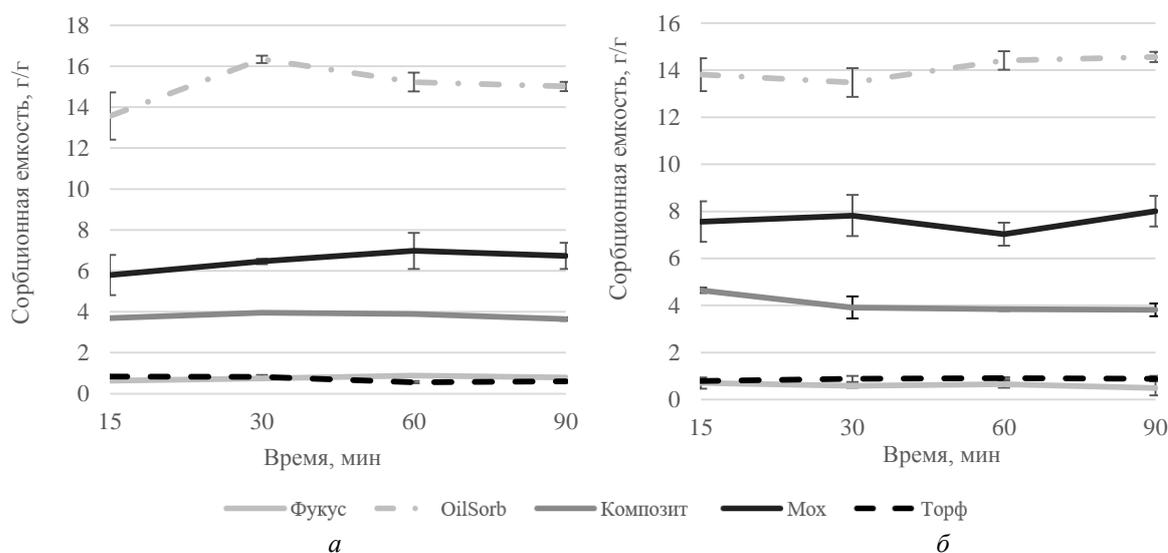


Рис. 3. Динамика сорбционной емкости сорбентов в зависимости от экспозиции в нефти:

а – при 10–12 °С; б – при 21–23 °С

Fig. 3. Dynamics of the sorption capacity of sorbents depending on exposure to oil:

а – under 10–12 °С; б – under 21–23 °С

Аналогичные эксперименты по оценке динамики сорбционной емкости материалов в отношении дизельного топлива (рис. 4, а и б) показали в случае использования сорбентов OilSorb, мха сфагнума и композита некоторую динамику снижения показателя сорбционной емкости, отражающую небольшую десорбцию нефтепродукта обратно в окружающую среду. Сорбент на основе мха сфагнума практически не изменял свою емкость в отношении дизельного топлива (в пределах стандартной ошибки опыта), что характеризует его как сорбционный материал, надежно удерживающий нефтепродукт на протяжении 30–90 мин.

В исследованных диапазонах температуры более выраженная динамика десорбции дизельного топлива при увеличении времени экспозиции наблюдалась в отношении коммерческого сорбента OilSorb, что накладывает определенные обязательства ко времени его использования, особенно в Арктическом регионе.

Сорбционная емкость природных материалов на основе торфа и фукуса практически не менялась от времени сорбции.

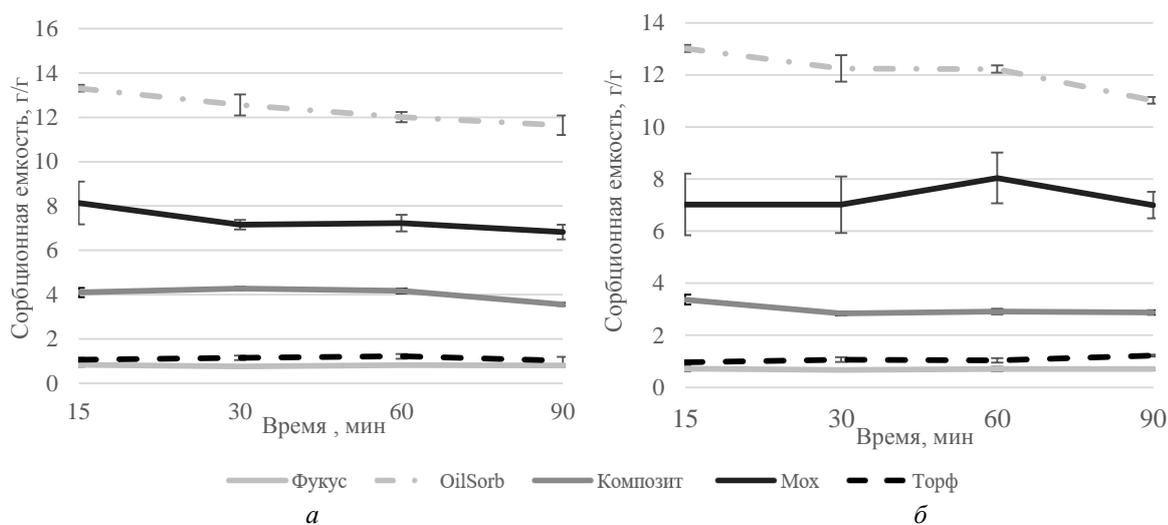


Рис. 4. Динамика сорбционной емкости сорбентов в зависимости от экспозиции в дизельном топливе: *a* – при 10–12 °С; *б* – при 21–23 °С  
 Fig. 4. Dynamics of the sorption capacity of sorbents depending on exposure to diesel fuel: *a* – under 10–12 °С; *б* – under 21–23 °С

#### Результаты исследования водоемкости сорбционных материалов

Показатель водоемкости (водопоглощения) является одним из критериев качества сорбента. Считается, что чем ниже водоемкость сорбента, тем эффективнее он будет работать в отношении поглощения нефтепродуктов. Поглощение воды и ее паров материалом приводит к уменьшению его нефтеемкости, а также способности удерживаться на поверхности воды при проведении ликвидации аварийных разливов нефти.

Результаты оценки водоемкости сорбционных материалов представлены на рис. 5. Наибольшее значение водоемкости в стандартных лабораторных условиях показал синтетический образец OilSorb ( $12,16 \pm 0,1$  г/г). Наименьшей водоемкостью, как и предполагалось, обладал фукус пузырчатый ( $0,34 \pm 0,1$  г/г). При моделировании условий окружающей среды, характерных для летнего периода на Кольском полуострове (рис. 5, *a*), сорбционная емкость исследуемых сорбентов по отношению к воде несколько возрастает.

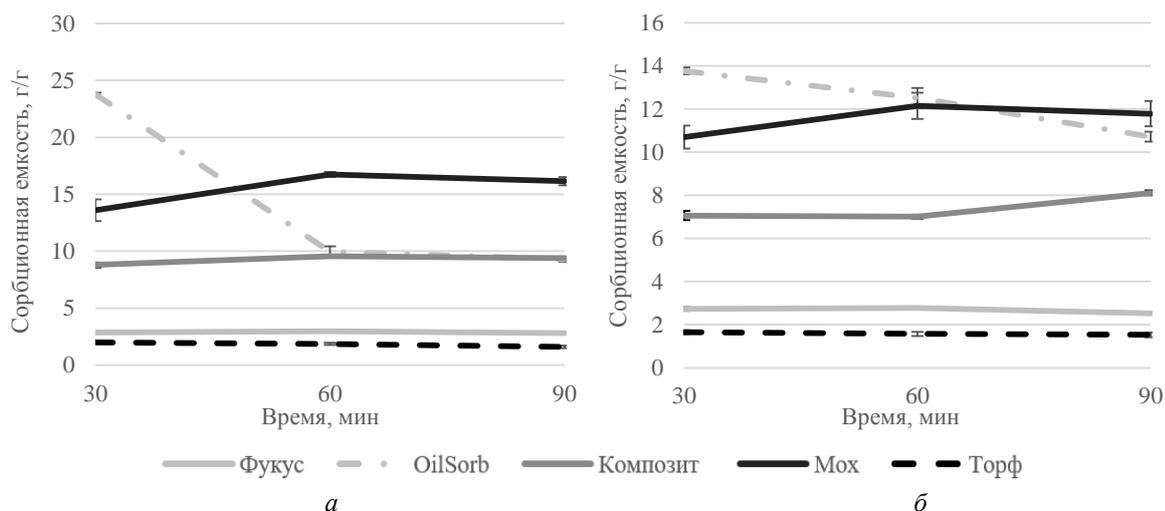


Рис. 5. Динамика водоемкости сорбентов: *a* – при 10–12 °С; *б* – при 21–23 °С  
 Fig. 5. Dynamics of water capacity of sorbents:  
*a* – the temperature is 10–12 °С, *б* – the temperature is 21–23 °С

Несмотря на показанную выше высокую эффективность в отношении нефтепоглощения (рис. 2, 3), синтетический образец показал также высокую водоемкость. С увеличением времени экспозиции отмечается

десорбция воды из структуры сорбента начиная с экспозиции в течение 60 мин; одновременно показатели нефтеемкости в этот же период времени в стандартных условиях несколько возрастают (рис. 3).

Необходимо отметить, что сорбция воды для исследуемых природных материалов сопоставима с их емкостью в отношении нефти и нефтепродуктов: чем больше водоемкость, тем больше нефтеемкость. Следовательно, такие природные сорбенты при испытаниях на пленке нефтепродуктов в реальных условиях ЛАРН будут поглощать и воду, тем самым снижая эффективность сорбции НП.

#### Результаты оценки сорбционных характеристик материалов в системе "морская вода – нефтепродукт"

Рассмотренные выше испытания сорбционных материалов проводятся по стандартным методикам ГОСТ 33627-2015 в отношении однокомпонентных систем "нефтепродукт" и "вода", что оказывает влияние на оценку фактических сорбционных свойств материалов, которые в случае использования в операциях ЛАРН на морской акватории попадают в двухкомпонентную систему "морская вода – нефтепродукт", способствующую изменению поведения сорбционных материалов и их эффективности в условиях реальной системы. В настоящем исследовании ставилась цель определить фактические сорбционные характеристики материалов в условиях, моделирующих реальный разлив нефти в морской акватории.

Результаты оценки эффективности использования сорбционных материалов в системе "морская вода – нефтепродукт" приведены на рис. 6, 7 и в табл. 1, 2.

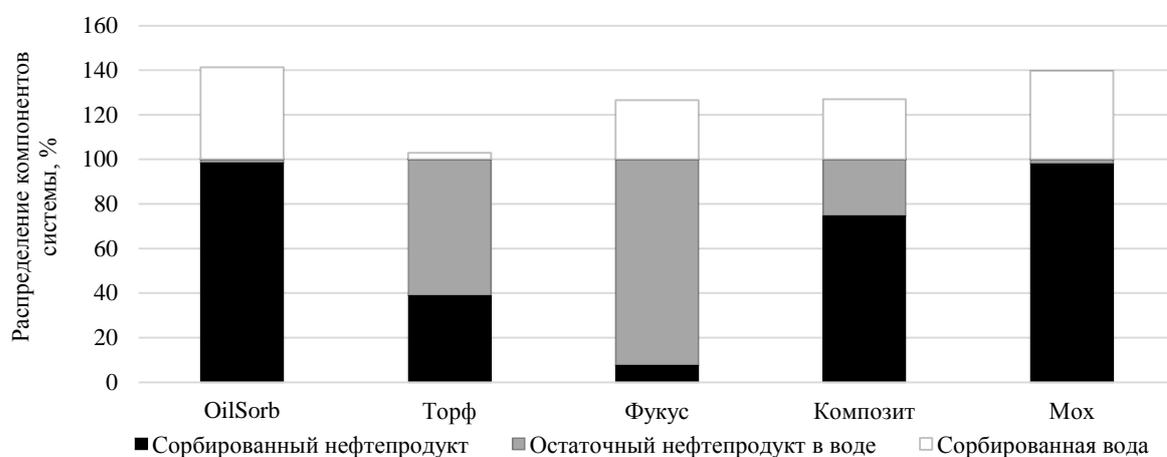


Рис. 6. Распределение сорбированных воды и НП в материалах и остаточного НП в воде системы "морская вода – нефть ARCO" при времени экспозиции 30 мин  
Fig. 6. Distribution of the sorbed components of the "sea water – ARCO oil" system at the exposure time equal to 30 minutes

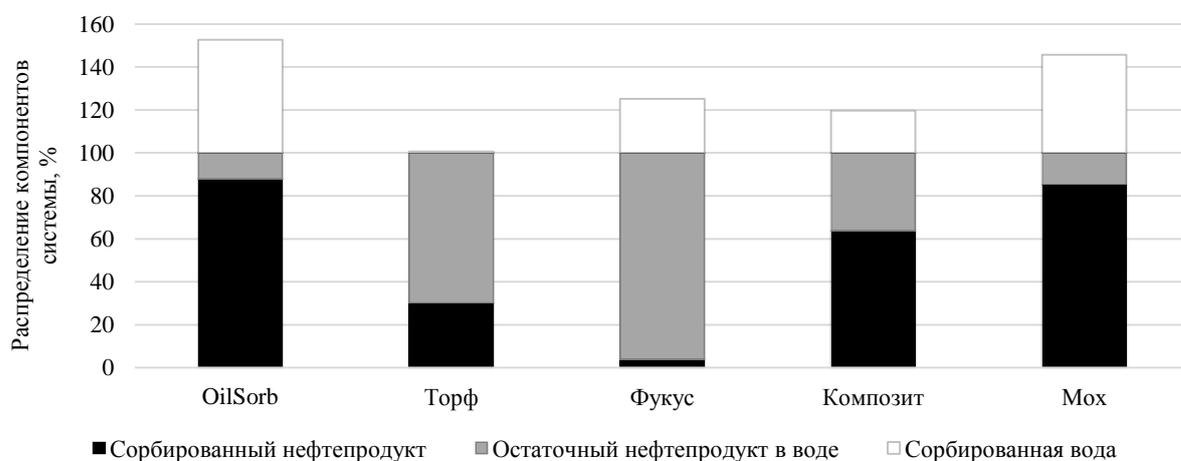


Рис. 7. Распределение сорбированных воды и НП в материалах и остаточного НП в воде системы "морская вода – дизельное топливо" при времени экспозиции 30 мин  
Fig. 7. Distribution of the sorbed components of the "sea water – diesel fuel" system at the exposure time equal to 30 minutes

Таблица 1. Распределение сорбированной воды и НП в материалах и остаточного НП в воде системы "морская вода – нефть ARCO" при различном времени экспозиции  
Table 1. Distribution of the sorbed components of the "sea water – ARCO oil" system at different exposures

Сорбционный материал	Экспозиция, мин	Количество остаточного нефтепродукта в воде, г	Количество сорбированного нефтепродукта, г	Количество сорбированной воды, г
OilSorb	30	0,09 ± 0,11	6,21	9,13
	60	0,07 ± 0,35	6,23	9,36
	90	0,34 ± 0,21	5,96	9,65
Торф (месторождение Катка-2, Мурманская область)	30	3,85 ± 0,14	2,45	0,28
	60	5,41 ± 0,17	0,89	0,76
	90	5,22 ± 0,17	1,08	0,64
Фукус пузырчатый ( <i>Fucus vesiculosus</i> )	30	5,82 ± 0,19	0,48	2,69
	60	6,24 ± 0,14	0,06	2,86
	90	5,42 ± 0,18	0,88	2,92
Композит [мох сфагнум (50 %) и фукус пузырчатый (50 %)]	30	1,59 ± 0,24	4,71	4,23
	60	5,02 ± 0,13	1,28	5,79
	90	6,09 ± 0,22	0,21	6,65
Мох сфагнум ( <i>Sphagnum palustre</i> L.)	30	0,11 ± 0,24	6,19	8,51
	60	0,09 ± 0,34	6,21	8,70
	90	0,10 ± 0,35	6,20	9,14

Таблица 2. Распределение сорбированной воды и НП в материалах и остаточного НП в воде системы "морская вода – дизельное топливо" при различном времени экспозиции  
Table 2. Distribution of the sorbed components of the "sea water – diesel fuel" system at different exposures

Сорбционный материал	Экспозиция, мин	Количество остаточного нефтепродукта в воде, г	Количество сорбированного нефтепродукта, г	Количество сорбированной воды, г
OilSorb	30	0,72 ± 0,14	5,23	13,56
	60	0,94 ± 0,10	5,01	13,2
	90	0,98 ± 0,29	4,97	14,31
Торф (месторождение Катка-2, Мурманская область)	30	4,16 ± 0,10	1,79	0,05
	60	4,20 ± 0,13	1,75	0,54
	90	4,28 ± 0,19	1,67	0,44
Фукус пузырчатый ( <i>Fucus vesiculosus</i> ),	30	5,72 ± 0,21	0,23	2,35
	60	5,64 ± 0,20	0,31	2,28
	90	5,71 ± 0,18	0,24	2,30
Композит [мох сфагнум (50 %) и фукус пузырчатый (50 %)]	30	2,15 ± 0,20	3,80	2,59
	60	2,04 ± 0,19	3,91	2,77
	90	2,01 ± 0,20	3,94	2,90
Мох сфагнум ( <i>Sphagnum palustre</i> L.)	30	0,88 ± 0,34	5,07	10,13
	60	0,78 ± 0,23	5,17	11,37
	90	0,77 ± 0,29	5,18	11,41

Анализ результатов показал, что испытания в модельной системе, имитирующей реальные условия, показали существенные изменения эффективности использования сорбционных материалов, продемонстрированной ими при стандартных условиях. Так, сорбент OilSorb, ранее значительно опережавший по показателям нефтеемкости остальные материалы (рис. 2, 3), показал сопоставимые результаты с материалом на основе мха сфагнума по количеству сорбированной нефти – 6,21 и 6,19 г соответственно при времени экспозиции 30 мин (рис. 6, табл. 1). Композитный материал "мох – фукус" сорбировал 74,8 % от имеющейся нефти, торф и фукус в модельной системе "морская вода – нефть ARCO" удалили менее половины разлитой нефти – 38,9 и 7,6 % соответственно (рис. 6). Очевидно, фукус за счет менее развитой поверхности и практически полного отсутствия пористой структуры не может рассматриваться в качестве сорбционного материала без возможной дополнительной обработки, что показали исследования как в стандартных условиях, так и в условиях, моделирующих реальный разлив нефти. Торф в данном эксперименте не показал себя в качестве эффективного сорбционного материала, но может рассматриваться потенциально как дешевый и достаточно доступный материал для сорбции нефти в условиях ЛАРН. Наиболее эффективными в условиях

системы "морская вода – нефть ARCO", моделирующих реальный разлив в акватории, в отношении сорбции сырой нефти оказались сорбционные материалы OilSorb (98,6 %) и мох сфагнум (98,3 %).

Наличие в моделируемой системе водной компоненты привело к тому, что сорбционные материалы продемонстрировали более низкие результаты, чем при сорбции в однокомпонентной системе только с нефтепродуктом. Так, определенная общая сорбционная емкость (нефте- и водоемкость) OilSorb в системе "морская вода – нефть ARCO" при экспозиции 30 мин составила  $15,34 \pm 0,11$  г и превысила заявленную производителем (10 г), но при этом 60,0 % сорбата составила вода (табл. 1). Аналогичные результаты наблюдались и для других сорбционных материалов независимо от типа НП в системе "морская вода – нефтепродукт" (табл. 1, 2). Следовательно, для расчета количества сорбционного материала при ЛАРН необходимо учитывать не только количество разлитой нефти и показатель сорбционной емкости, определенный по ГОСТу, но принимать во внимание снижение селективности сорбции материалов в отношении нефтепродуктов в реальной системе "морская вода – нефтепродукт".

Проведенная ранее оценка водоемкости природных материалов коррелирует с их способностью поглощать воду в модельной системе "морская вода – нефтепродукт". Так, торф и фукус сорбировали наименьшее количество воды при определении водоемкости (рис. 5), и эти же сорбционные материалы показали соответственно наименьшие величины поглощенной воды в системе "морская вода – нефтепродукт" (табл. 1, 2). Но для синтетического образца OilSorb эта зависимость не соблюдалась в условиях экспозиции 60 и 90 мин (рис. 5, табл. 1, 2). Предположительно, модифицирование исследуемых природных сорбционных материалов в отношении повышения их гидрофобности может привести к более высоким показателям нефтеемкости.

При этом в условиях, моделирующих разлив нефтепродукта на поверхности морской акватории, наблюдалась определенная ранее способность сорбентов эффективнее поглощать дизельное топливо (табл. 2), что коррелирует с вышеприведенными результатами стандартной оценки показателей сорбционной емкости при температуре окружающей среды 10–12 °С (рис. 2, 3). Наиболее эффективными в сорбции дизельного топлива также оказались OilSorb (87,9 %) и мох сфагнум (85,2 %), наименее результативными – сорбенты торф (30,1 %) и фукус (3,9 %) (рис. 7, табл. 2). Тенденция к большему поглощению воды у материалов с ранее отмеченной высокой водоемкостью сохранялась в системе "вода – дизельное топливо" как для природных, так и для синтетических сорбентов.

В системе "морская вода – нефть ARCO" результаты исследования сорбции в динамике (табл. 1) свидетельствуют об увеличении нефтеемкости OilSorb при экспозиции 60 мин, однако при экспозиции 90 мин наблюдается десорбция нефти. Сорбционные материалы на основе торфа и фукуса в этих же условиях показывают некоторые колебания сорбции/десорбции нефти в течение экспозиции 30, 60, 90 мин. Сорбционный материал на основе мха демонстрировал стабильную сорбцию нефти на протяжении всего периода экспозиции.

В системе "морская вода – дизельное топливо" динамика сорбции материалами дизельного топлива (табл. 2) в целом аналогична динамике сорбции материалами сырой нефти. Однако в данной системе в целом эффективный сорбционный материал OilSorb уже при достижении времени экспозиции 60 мин показывает некоторую десорбцию поглощенного нефтепродукта, а сорбция им воды становится более интенсивной, что влечет за собой рекомендации выдерживать этот сорбент на поверхности воды, загрязненной нефтью или дизельным топливом, не более 60 мин. Сорбционные материалы на основе торфа и фукуса также показали снижение сорбции дизельного топлива и повышение процессов сорбции воды по достижении времени экспозиции 60 мин. В отношении композита "мох – фукус" и сорбционного материала на основе мха установлена стабильная динамика возрастания сорбции дизельного топлива на протяжении всего времени экспозиции в течение 30, 60 и 90 мин. В отношении сорбционного материала на основе мха можно отметить, что по истечении времени экспозиции 60 мин его способность поглощать дизельное топливо стала превышать аналогичный показатель у коммерческого синтетического сорбента OilSorb (5,17 г против 5,01 г соответственно); при увеличении времени экспозиции это преимущество сохранялось.

## Заключение

Проведенное исследование сорбционных характеристик природных материалов органического происхождения на основе регионального сырья: мха сфагнума *Sphagnum palustre* L., торфа (месторождение Катка-2, Мурманская область), фукуса пузырчатого *Fucus vesiculosus*, композита [мох сфагнум (50 %) и фукус пузырчатый (50 %)] – в сравнении с используемым в практике аварийно-спасательных подразделений региона синтетическим сорбентом OilSorb позволило оценить возможность их использования в качестве сорбентов для ЛАРН в условиях арктической акватории.

Экспериментальные данные сорбционной емкости природных материалов определены в отношении нефтеемкости потенциальных загрязнителей акватории Баренцева моря (нефти сорта ARCO, судового дизельного топлива) и показателя водоемкости сорбентов для стандартных условий при температуре 21–23 °С (согласно ГОСТ 33627-2015) и в условиях диапазона значений температуры 10–12 °С, характерных для

летнего периода на Кольском полуострове. Полученные результаты сопоставлены в отношении различного времени экспозиции сорбционных материалов в нефтепродуктах и морской воде.

Наибольшие показатели нефтеемкости, определяемые стандартными методами, в отношении как нефти сорта ARCO, так и в отношении дизельного топлива установлены для коммерческого сорбента OilSorb и материала на основе мха сфагнома при всех исследованных диапазонах температуры и времени экспозиции. Отмечено, что в этих случаях сорбционный материал на основе мха сфагнома уступал в эффективности сорбции коммерческому сорбенту OilSorb на 38,3–50,7 % в отношении дизельного топлива и на 32,5–46,8 % – в отношении нефти, при этом его абсолютные показатели нефтеемкости находились в диапазоне 6,0–9,0 г/г, что соответствует аналогичным показателям для высоковольтных коммерческих сорбентов.

В ходе исследования проведена оценка сорбционных характеристик рассматриваемых материалов в системе "морская вода – нефтепродукт", моделирующей реальный разлив нефти в морской акватории. Испытания в модельной системе, имитирующей реальные условия, показывают существенные изменения эффективности использования сорбционных материалов, продемонстрированной ими при стандартных условиях. Так, коммерческий сорбент OilSorb, значительно опережавший по стандартным показателям нефтеемкости остальные сорбционные материалы, показал сопоставимые результаты по количеству извлеченной нефти с материалом на основе мха сфагнома.

Наличие в реальной системе водной компоненты приводит к более низким результатам извлечения НП, чем при сорбции в идеальных лабораторных условиях однокомпонентной системы согласно ГОСТ 33627-2015. Для расчета количества сорбционного материала при ЛАРН рекомендуется учитывать не только количество разлитой нефти и показатель сорбционной емкости, определенный по ГОСТу, но и принимать во внимание снижение селективности сорбции материалов в отношении нефтепродуктов в реальной системе "морская вода – нефтепродукт".

Динамика распределения сорбированной НП и воды в материалах, а также остаточного НП в воде в системах "морская вода – нефть ARCO" и "морская вода – дизельное топливо" установлена при различном времени экспозиции. В течение времени экспозиции 30, 60, 90 мин в условиях системы, моделирующей реальный разлив нефти в акватории, наиболее эффективными и устойчивыми во времени показателями сорбции нефтепродуктов обладает сорбционный материал на основе мха сфагнома.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра "Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования", а также в рамках НИОКР Мурманского арктического университета № 124041100087-0 "Мониторинг антропогенного воздействия на экосистемы и разработка подходов, технологий и материалов восстановления и сохранения природных сред в условиях Арктического региона".

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Денисова Т. Р., Шайхiev И. Г., Сиппель И. Я., Кузнецова Н. П. [и др.]. Влияние кислотной обработки опилок липы на нефтеемкость // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 20. С. 275–277. EDN: VBWOXD.
- Евстигнеев В. Д., Графова Е. О. Перспективы применения древесных отходов для обеспечения экологической безопасности лесозаготовительных предприятий // Resources and Technology. 2016. Т. 13, № 3. С. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2016.3341>. EDN: XRZMZT.
- Иванов И. П., Судакова И. Г., Иванченко Н. М., Кузнецов Б. Н. Изучение свойств активных углей из зерновой коры лиственницы // Химия растительного сырья. 2011. № 1. С. 81–86. EDN: NJBFKB.
- Каменщиков Ф. А., Богомольный Е. И. Нефтяные сорбенты. М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2005. С. 265–267.
- Левченко М. Л. Состояние сырьевой базы и возможности использования глауконитов в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2008. № 2. С. 27–31. EDN: JXSWHF.
- Лим Л. А., Реутов В. А., Руденко А. А., Чудовский А. С. Нефтеемкость сорбента: проблема выбора методики определения // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 144–150.
- Нифталиев С. И., Перегудов Ю. С., Мокшина Н. Я., Мэжри Р. Влияние термической активации глауконита на его влаго- и нефтеемкость // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 7. С. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-42-47>. EDN: RXYAKA.
- Семенович А. В., Лоскутов С. Р. Сбор проливов нефтепродуктов модифицированной корой хвойных пород // Химия растительного сырья. 2008. № 2. С. 113–117. EDN: JSIRBL.

- Телушкина Т. Ю., Медведев А. В. Фракционный состав и нефтеемкость глауконитового песка // Новые технологии – нефтегазовому региону : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ. Т. 1. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. С. 69–71.
- Цомбуева Б. В. Применение природных материалов в качестве сорбентов для очистки почв от нефтяного загрязнения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. EDN: TGRGZL. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15695>.
- Яковлев Б. А. Климат Мурманска. Ленинград : Гидрометеиздат, 1972. 106 с.
- Annunciado T. R., Sydenstricker T. H. D., Amico S. C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills // Marine Pollution Bulletin. 2005. Vol. 50, Iss. 11. P. 1340–1346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.04.043>.
- Banerjee S. S., Joshi M. V., Jayaram R. V. Treatment of oil spill by sorption technique using fatty acid grafted sawdust // Chemosphere. 2006. Vol. 64, Iss. 6. P. 1026–1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.065>.
- Behnood R., Anvaripour B., Jaafarzadeh N., Farasati M. Oil spill sorption using raw and acetylated sugarcane bagasse // Journal of Central South University. 2016. Vol. 23. P. 1618–1625. DOI: [10.1007/s11771-016-3216-8](https://doi.org/10.1007/s11771-016-3216-8).
- Choi H. M., Cloud R. M. Natural sorbents in oil spill cleanup // Environmental Science & Technology. 1992. Vol. 26, Iss. 4. P. 772–776. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00028a016>.
- Díaz M. A. D., Frómata A. E. N., Muñoz C. L. S. Improved sorbent for the removal of hydrocarbons spilled in water // Frontiers in Sustainability. 2022. Vol. 3. Article number: 962215. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.962215>.
- El Gheriany I. A., El Saqa F. A., El Razek Amer A. A., Hussein M. Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59, Iss. 2. P. 925–932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.024>.
- Guilharduci V. V. da Silva, Martelli P. B., Gorgulho H. de Fátima. Efficiency of sugarcane bagasse-based sorbents for oil removal from engine washing wastewater // Water Science and Technology. 2017. Vol. 75, Iss. 1. P. 173–181. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.476>.
- Haussard M., Gaballah I., Kanari N., de Donato Ph. [et al.]. Separation of hydrocarbons and lipid from water using treated bark // Water Research. 2003. Vol. 37, Iss. 2. P. 362–374. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00269-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00269-5).
- Huang X., Lim T.-T. Performance and mechanism of a hydrophobic-oleophilic kapok filter for oil/water separation // Desalination. 2006. Vol. 190, Iss. 1–3. P. 295–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.09.009>.
- Hussein M., Amer A. A., El-Maghraby A., Hamedallah N. Oil spill removal from water by using corn stalk: Factors affecting sorption process // International Journal of Environment and Waste Management. 2015. Vol. 16, Iss. 4. P. 281–292. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijewm.2015.074907>.
- Ibrahim S., Wang S., Ang H. M. Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste barley straw // Biochemical Engineering Journal. 2010. Vol. 49, Iss. 1. P. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.11.013>.
- Ifelebuegu A. O., Momoh Z. An evaluation of the adsorptive properties of coconut husk for oil spill cleanup // Proc. of the Intern. Conf. on *Advances in Applied Science and Environmental Technology – ASET 2015*. Bangkok, Thailand, 2015. P. 33–37.
- Inagaki M., Toyoda M., Iwashita N., Nishi Y. [et al.]. Sorption, recovery and recycle of spilled heavy oils using carbon materials // TANSO. 2002. Vol. 2002, Iss. 201. P. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.7209/tanso.2002.16>.
- Khan E., Virojnagud W., Ratpukdi T. Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff // Chemosphere. 2004. Vol. 57, Iss. 7. P. 681–689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.028>.
- Kobayashi Y., Matsuo R., Nishiyama M. Method for absorption of oils. Japanese Patent 52,138,081, November 17, 1977.
- Kudaybergenov K., Ongarbayev Y., Mansurov Z., Doszhanov Y. Study on the effectiveness of thermally treated rice husks for petroleum adsorption // Journal of Non-Crystalline Solids. 2012. Vol. 358, Iss. 22. P. 2964–2969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.07.017>.
- Li D., Zhu F. Z., Li J. Y., Na P. [et al.]. Preparation and characterization of cellulose fibers from corn straw as natural oil sorbents // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. Vol. 52, Iss. 1. P. 516–524. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie302288k>.
- Lim T.-T., Huang X. Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup // Chemosphere. 2007. Vol. 66, Iss. 5. P. 955–963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.062>.
- Liu J., Chen Y., Zhang B., Zhang Q. [et al.]. Superhydrophobic straw felt for oil absorption // Results in Engineering. 2022. Vol. 13. Article number: 100370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100370>.
- Paulauskienė T., Jucikė I. Aquatic oil spill cleanup using natural sorbents // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22, Iss. 19. P. 14874–14881. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4725-y>.

- Razavi Z., Mirghaffari N., Rezaei B. Performance comparison of raw and thermal modified rice husk for decontamination of oil polluted water // CLEAN – Soil, Air, Water. 2015. Vol. 43, Iss. 2. P. 182–190. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201300753>.
- Ribeiro T. H., Rubio J., Smith R. W. A dried hydrophobic aquaphyte as an oil filter for oil/water emulsions // Spill Science & Technology Bulletin. 2003. Vol. 8, Iss. 5–6. P. 483–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1353-2561\(03\)00130-0](https://doi.org/10.1016/s1353-2561(03)00130-0).
- Saito M., Ishii N., Ogura S., Maemura S. Development and water tank tests of SBS (*Sugi* Bark Sorbent) // International Oil Spill Conference Proceedings. 2001. Vol. 2. P. 1485–1495. DOI: <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2001-2-1485>.
- Sidik S. M., Jalil A. A., Triwahyono S., Adam S. H. [et al.]. Modified oil palm leaves adsorbent with enhanced hydrophobicity for crude oil removal // Chemical Engineering Journal. 2012. Vol. 203. P. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.132>.
- Suni S., Kosunen A.-L., Hautala M., Pasila A. [et al.]. Use of a by-product of peat excavation, cotton grass fibre, as a sorbent for oil-spills // Marine Pollution Bulletin. 2005. Vol. 49, Iss. 11–12. P. 916–921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.06.015>.
- Teas Ch., Kalligeros S., Zanicos F., Stournas S. [et al.]. Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up // Desalination. 2001. Vol. 140, Iss. 3. P. 259–264. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(01\)00375-7](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(01)00375-7).
- Tijani M. M., Aqsha A., Mahinpey N. Development of oil-spill sorbent from straw biomass waste: Experiments and modeling studies // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 171. P. 166–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.010>.
- Witka-Jeżewska E., Hupka J., Pieniżek P. Investigation of oleophilic nature of straw sorbent conditioned in water // Spill Science & Technology Bulletin. 2003. Vol. 8, Iss. 5–6. P. 561–564. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1353-2561\(03\)00069-0](https://doi.org/10.1016/s1353-2561(03)00069-0).
- Zhao J., Xiao C., Xu N. Evaluation of polypropylene and poly (butylmethacrylate-co-hydroxyethylmethacrylate) nonwoven material as oil absorbent // Environmental Science and Pollution Research. 2013. Vol. 20, Iss. 6. P. 4137–4145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1397-8>.

## References

- Denisova, T. R., Shaykhiyev, I. G., Sippel, I. Ya., Kuznetsova, N. P. et al. 2015. Influence of acid processing of sawdust of a linden on oil capacity. *Bulletin of the Technological University*, 18(20), pp. 275–277. EDN: VBWOXD. (In Russ.)
- Evstigneev, V. D., Grafova, E. O. 2016. Prospects for the use of wood waste to ensure environmental safety of logging enterprises. *Resources and Technology*, 13(3), pp. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2016.3341>. EDN: XRZMT. (In Russ.)
- Ivanov, I. P., Sudakova, I. G. 2011. Study of the properties of active carbons from granulated larch bark. *Khimiya Rastitelnogo Syr'ya*, 1, pp. 81–86. EDN: NJBFKB. (In Russ.)
- Kamenshchikov, F. A., Bogomolny, E. I. 2005. Oil sorbents. Moscow, pp. 265–267. (In Russ.)
- Levchenko, M. L. 2008. State of the raw material base and the possibility of using glauconites in Russia. *Mineral Resources of Russia. Economics and management*, 2, pp. 27–31. EDN: JXSWHF. (In Russ.)
- Lim, L. A., Reutov, V. A., Rudenko, A. A., Chudovsky, A. S. 2018. Oil capacity of the sorbent: The problem of choosing a determination method. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*, 10, pp. 144–150. (In Russ.)
- Niftaliev, S. I., Peregudov, Yu. S., Mokshina, N. Ya., Mazhri, R. 2019. The influence of thermal activation of glauconite on its moisture and oil capacity. *Ekologiya i Promyshlennost Rossii*, 23(7), pp. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-42-47>. EDN: RXYAKA. (In Russ.)
- Semenovich, A. V., Loskutov, S. R. 2008. Collection of oil spills with modified coniferous bark. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2, pp. 113–117. EDN: JSIRBL. (In Russ.)
- Telushkina, T. Yu., Medvedev, A. V. 2013. Fractional composition and oil capacity of glauconite sand. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference *New technologies for the oil and gas region*. Tyumen, pp. 69–71. (In Russ.)
- Tsombueva, B. V. 2014. The use of natural materials as sorbents for cleanup of soils from oil pollution. *Modern Problems of Science and Education*, 6. EDN: TGRGZL. URL: <https://science-education.ru/article/view?id=15695>. (In Russ.)
- Yakovlev, B. A. 1972. Climate of Murmansk. Leningrad. (In Russ.)
- Annunciado, T. R., Sydenstricker, T. H. D., Amico, S. C. 2005. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, 50(11), pp. 1340–1346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.04.043>.
- Banerjee, S. S., Joshi, M. V., Jayaram, R. V. 2006. Treatment of oil spill by sorption technique using fatty acid grafted sawdust. *Chemosphere*, 64(6), pp. 1026–1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.065>.

- Behnood, R., Anvaripour, B., Jaafarzadeh, N., Farasati, M. 2016. Oil spill sorption using raw and acetylated sugarcane bagasse. *Journal of Central South University*, 23, pp. 1618–1625. DOI: 10.1007/s11771-016-3216-8.
- Choi, H. M., Cloud, R. M. 1992. Natural sorbents in oil spill cleanup. *Environmental Science & Technology*, 26(4), pp. 772–776. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00028a016>.
- Díaz, M. A. D., Frómeta, A. E. N., Muñoz, C. L. S. 2022. Improved sorbent for the removal of hydrocarbons spilled in water. *Frontiers in Sustainability*, 3. Article number: 962215. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.962215>.
- El Gheriany, I. A., El Saqa, F. A., El Razek Amer, A. A., Hussein, M. 2020. Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), pp. 925–932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.024>.
- Guilharduci, V. V. da Silva, Martelli, P. B., Gorgulho, H. de Fátima. 2017. Efficiency of sugarcane bagasse-based sorbents for oil removal from engine washing wastewater. *Water Science and Technology*, 75(1), pp. 173–181. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.476>.
- Haussard, M., Gaballah, I., Kanari, N., de Donato, Ph. et al. 2003. Separation of hydrocarbons and lipid from water using treated bark. *Water Research*, 37(2), pp. 362–374. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00269-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00269-5).
- Huang, X., Lim, T.-T. 2006. Performance and mechanism of a hydrophobic-oleophilic kapok filter for oil/water separation. *Desalination*, 190(1–3), pp. 295–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.09.009>.
- Hussein, M., Amer, A. A., El-Maghraby, A., Hamedallah, N. 2015. Oil spill removal from water by using corn stalk: Factors affecting sorption process. *International Journal of Environment and Waste Management*, 16(4), pp. 281–292. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijewm.2015.074907>.
- Ibrahim, S., Wang, S., Ang, H. M. 2010. Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste barley straw. *Biochemical Engineering Journal*, 49(1), pp. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.11.013>.
- Ifelebuegu, A. O., Momoh, Z. 2015. An evaluation of the adsorptive properties of coconut husk for oil spill cleanup. Proc. of the Intern. Conf. on *Advances in Applied Science and Environmental Technology – ASET 2015*. Bangkok, Thailand, pp. 33–37.
- Inagaki, M., Toyoda, M., Iwashita, N., Nishi, Y. et al. 2002. Sorption, recovery and recycle of spilled heavy oils using carbon materials. *TANSO*, 2002(201), pp. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.7209/tanso.2002.16>.
- Khan, E., Virojnagud, W., Ratpukdi, T. 2004. Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. *Chemosphere*, 57(7), pp. 681–689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.028>.
- Kobayashi, Y., Matsuo, R., Nishiyama, M. 1977. Method for absorption of oils. Japanese Patent 52,138,081, November 17, 1977.
- Kudaybergenov, K., Ongarbayev, Y., Mansurov, Z., Doszhanov, Y. 2012. Study on the effectiveness of thermally treated rice husks for petroleum adsorption. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(22), pp. 2964–2969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.07.017>.
- Li, D., Zhu, F. Z., Li, J. Y., Na, P. et al. 2013. Preparation and characterization of cellulose fibers from corn straw as natural oil sorbents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(1), pp. 516–524. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie302288k>.
- Lim, T.-T., Huang, X. 2007. Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. *Chemosphere*, 66(5), pp. 955–963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.062>.
- Liu, J., Chen, Y., Zhang, B., Zhang, Q. et al. 2022. Superhydrophobic straw felt for oil absorption. *Results in Engineering*, 13. Article number: 100370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100370>.
- Paulauskienė, T., Jucikė, I. 2015. Aquatic oil spill cleanup using natural sorbents. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(19), pp. 14874–14881. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4725-y>.
- Razavi, Z., Mirghaffari, N., Rezaei, B. 2015. Performance comparison of raw and thermal modified rice husk for decontamination of oil polluted water. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 43(2), pp. 182–190. DOI: <https://doi.org/10.1002/clen.201300753>.
- Ribeiro, T. H., Rubio, J., Smith, R. W. 2003. A dried hydrophobic aquaphyte as an oil filter for oil/water emulsions. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(5–6), pp. 483–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1353-2561\(03\)00130-0](https://doi.org/10.1016/s1353-2561(03)00130-0).
- Saito, M., Ishii, N., Ogura, S., Maemura, S. 2001. Development and water tank tests of SBS (*Sugi* Bark Sorbent). *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2, pp. 1485–1495. DOI: <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2001-2-1485>.
- Sidik, S. M., Jalil, A. A., Triwahyono, S., Adam, S. H. et al. 2012. Modified oil palm leaves adsorbent with enhanced hydrophobicity for crude oil removal. *Chemical Engineering Journal*, 203, pp. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.132>.

- Suni, S., Kosunen, A.-L., Hautala, M., Pasila, A. et al. 2005. Use of a by-product of peat excavation, cotton grass fibre, as a sorbent for oil-spills. *Marine Pollution Bulletin*, 49(11–12), pp. 916–921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.06.015>.
- Teas, Ch., Kalligeros, S., Zankos, F., Stournas, S. et al. 2001. Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up. *Desalination*, 140(3), pp. 259–264. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(01\)00375-7](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(01)00375-7).
- Tijani, M. M., Aqsha, A., Mahinpey, N. 2016. Development of oil-spill sorbent from straw biomass waste: Experiments and modeling studies. *Journal of Environmental Management*, 171, pp. 166–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.010>.
- Witka-Jeżewska, E., Hupka, J., Pieniżek, P. 2003. Investigation of oleophilic nature of straw sorbent conditioned in water. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(5–6), pp. 561–564. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1353-2561\(03\)00069-0](https://doi.org/10.1016/s1353-2561(03)00069-0).
- Zhao, J., Xiao, C., Xu, N. 2013. Evaluation of polypropylene and poly (butylmethacrylate-co-hydroxyethylmethacrylate) nonwoven material as oil absorbent. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(6), pp. 4137–4145. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1397-8>.

#### Сведения об авторах

**Васильева Жанна Вячеславовна** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: [vasilevazhv@mstu.edu.ru](mailto:vasilevazhv@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

**Zhanna V. Vasileva** – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: [vasilevazhv@mstu.edu.ru](mailto:vasilevazhv@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

**Тришина Анастасия Сергеевна** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский арктический университет, зав. лабораторией; e-mail: [trishinaas@mstu.edu.ru](mailto:trishinaas@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2557-8816>

**Anastasia S. Trishina** – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk Arctic University; e-mail: [trishinaas@mstu.edu.ru](mailto:trishinaas@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2557-8816>

Нормативные документы, использованные в статье

ГОСТ 33627-2015	Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов. URL: <a href="https://docs.cntd.ru/document/1200133296">https://docs.cntd.ru/document/1200133296</a> .
ГОСТ 33622-2015	Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик абсорбентов. URL: <a href="https://docs.cntd.ru/document/1200133295">https://docs.cntd.ru/document/1200133295</a> .
Распоряжение Правительства РФ № 3363-р от 27.11.2021 г.	Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. URL: <a href="https://docs.cntd.ru/document/727294161">https://docs.cntd.ru/document/727294161</a> .
Федеральный закон № 459-ФЗ от 29.11.2018 (ред. от 02.12.2019 г.)	О федеральном бюджете на 2019 г. и на плановый период 2020 и 2021 гг. URL: <a href="https://docs.cntd.ru/document/551785929">https://docs.cntd.ru/document/551785929</a> . (В этом законе представлена государственная программа РФ "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации").
Распоряжение Правительства РФ № 2101-р от 30.09.2018 г.	Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г. URL: <a href="https://docs.cntd.ru/document/551365461">https://docs.cntd.ru/document/551365461</a> . (Федеральный проект "Северный морской путь" рассмотрен в составе Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г.).
Распоряжение Правительства РФ № 1103-р от 28.04.2023	О внесении изменений в план развития Северного морского пути на период до 2035 г., утв. распоряжением Правительства РФ от 01.08.2022 № 2115-р. URL: <a href="http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305020028">http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305020028</a> .
ТУ 214-10942238-03-95	Оценка эффективности сорбента. М. : Стандартиформ, 1995. 24 с.
ПНД Ф 14.1: 2.116-97	Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных и сточных вод методом колоночной хроматографии с гравиметрическим методом. Введен 21 марта 1997 г. URL : <a href="https://docs.cntd.ru/document/1200066876">https://docs.cntd.ru/document/1200066876</a> .
Постановление Правительства РФ № 2124 от 16.12.2020 г.	"Об утверждении требований к составу и оснащению аварийно-спасательных служб и (или) аварийно-спасательных формирований, участвующих в осуществлении мероприятий по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов". URL: <a href="https://base.garant.ru/75083147/">https://base.garant.ru/75083147/</a> .