

УДК 628.516:625.1:656.225.073.437:622.24.00442

EDN: EODCOS

Опыт практической реализации очистки почвы, земляного полотна и воды от загрязнения фенолом и нефтепродуктами

ISSN 1996-8493

DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77

© Технологии гражданской безопасности, 2023

В.А. Пашинин, О.А. Ульянова, В.В. Татаринов, П.Н. Косырев, Б.Л. Недорчук

Аннотация

В статье определены основные направления исследований по возможности применения различных способов и видов очистки воды и земляного полотна от соединений фенола и нефтепродуктов для достижения требуемых характеристик безопасности.

В ходе исследования оценивались результаты химического и микробиологического контроля за процессом очистки воды и почвенного полотна.

Ключевые слова: нефтепродукты; подземные воды; фенол; экспресс-обнаружение; утилизация.

Practical Experience in Soil, Roadbed and Water Phenol and Petroleum Products Decontamination

ISSN 1996-8493

DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77

© Civil Security Technology, 2023

V. Pashinin, O. Ulyanova, V. Tatarinov, P. Kosyrev, B. Nedorchuk

Abstract

The article defines main research directions of the possibility to use various methods and types of water and roadbed decontamination from phenol compounds and petroleum products to achieve the required safety characteristics.

In the course of the study, the results of chemical and microbiological control over the process of water and soil bed decontamination were evaluated.

Key words: petroleum products; groundwater; phenol; express detection; disposal.

26.07.2023

Введение

Актуальность темы статьи обусловлена увеличением случаев загрязнения почвы, земляного полотна и воды соединениями фенола и нефтепродуктами в результате аварий при добыче и перевозке таких продуктов.

В настоящее время одним из перспективных направлений является разработка технологии очистки почвы, земляного полотна и воды от соединений фенола и нефтепродуктов путем предварительной оценки степени и масштаба загрязнения грунта и подземных вод с последующим частичным извлечением и утилизацией воды и загрязненного грунта в специализированных организациях.

Целью статьи является изучение опыта очистки почвы, земляного полотна и воды от соединений фенола и нефтепродуктов.

Задачами работы было провести обзор и изучение существующих технологий и рекомендаций по использованию наиболее передовых разработок очистки почвы и воды от нефтепродуктов и соединений фенолов.

1. Об аналитических и научно-экспертных работах на объекте аварии при разливе соединений фенола и нефтепродуктов

Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве и санитарно-эпидемиологические требования по очистке населенных мест определены соответствующими правилами и нормативами.

В Российской Федерации незагрязненной считается почва с содержанием нефтепродуктов менее 1000 мг/кг¹.

Это близко к требованиям, предъявляемым к качеству почв в мировой практике. По нормам стран Западной Европы допустимое содержание углеводов в почве составляет 1000 мг/кг. При содержании углеводов в почве вдоль дорог выше 2000 мг/кг они рассматриваются как загрязненные и требующие очистки^{2,3}.

Случаи загрязнения почвы и грунтовых вод нефтепродуктами и фенолами неоднократно имели место как на объектах железнодорожного транспорта, так и на предприятиях военно-транспортного комплекса.

Так, в результате аварии, произошедшей 14 мая 1996 года на разъезде Мыслец Горьковской железной дороги, имел место сход с рельсов железнодорожного состава и разлив на грунт нефтепродуктов и фенола, что привело к загрязнению окружающей территории⁴.

Для оценки последствий аварии были привлечены: научно-исследовательские организации и центры Госкомэкологии России, Минздрава России;

Новосибирский научно-инженерный центр ЭКОЛОГИЯ МПС России; Росгидромет; МЧС России; Российская академия наук; фирма «БЕГОР» института ГосНИИ-синтезбелок; МИИТ и другие организации. Межведомственной комиссией, проведенной Госкомэкологии России 9 апреля 1997 года, отмечалось, что выполненный комплекс аналитических и научно-экспертных работ на объекте аварии является достаточным для объективного обоснования принимаемых практических мер по ликвидации последствий аварии согласно поручению Правительства БН-П10–14500 от 25 мая 1998 г.

На основании этих научно-экспериментальных работ, выполненных на территории загрязнения нефтепродуктами и в соответствии с типовым технологическим регламентом, была произведена очистка почвы, грунтов и поверхности водоемов от нефтепродуктов и фенолов на загрязненной территории.

В ходе этих работ применялись физико-химические, механические, биологические методы очистки.

Результаты исследований по району аварии, выполненных независимой экспертизой: Институтом водных проблем Российской академии наук и Ассоциацией водопользователей, показали, что в результате пожара и осаждения части продуктов сгорания на земную поверхность в день аварии площадь загрязнения почвы составила несколько сотен гектаров с концентрацией аэрозольной сажи, не превышающей разовую предельно-допустимую концентрацию (3 мг/куб. м); фенола попало в почвогрунт менее 1%, дизельного топлива — 17%. Объем загрязненного грунта в эпицентре аварии составил примерно 7000 м³.

Принятые своевременные меры по ликвидации последствий аварийной ситуации, по заключению Министерства сельского хозяйства и продовольствия Чувашской Республики, а также заключению республиканской санитарно-противоэпидемической комиссии от 23.09.1996, позволили предотвратить отрицательное влияние последствий аварии на растения и животных.

В воде рек Сура и Волга превышение предельно допустимой концентрации фенола и нефтепродуктов также не было обнаружено.

Была также оказана существенная материальная помощь жителям прилегающей территории.

Работы по ликвидации загрязнения были полностью завершены с участием фирмы БИГОР при институте ГосНИИсинтезбелок на базе лаборатории «Ферментационных технологий» в 2001 году.

Таким образом, Горьковская железная дорога, как виновник аварии, добровольно возместила весь материальный и моральный ущерб, причиненный жителям загрязненной и очищенной территории.

¹ ГОСТ Р 59060-2020. Охрана окружающей среды Земли. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации.

² Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве : изменения в ГН 2.1.7.2041-06: гигиенические нормативы: 2.1.7. Гигиена. Коммунальная гигиена. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы / Разраб.: А. А. Масленников и др. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 2018. 5 с.

³ Санитарно-эпидемиологические требования к обращению с медицинскими отходами: 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы : санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.1.7.2790-10 / Разраб.: О. И. Аксенова и др. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 30 с.

⁴ https://вдпо.пф/calendar/1996-5-14_proizoshla-krupnaya-zheleznodorozhnaya-avariyu-na-stantsii-myslets/ дата обращения 21.07.2023 г.

2. О применении технологий и методов очистки территорий от нефтезагрязнений и фенола

При разливе нефтепродуктов, как правило: проводятся определение степени загрязнения нефтью, топографическая съемка с отбором образцов грунта и воды на различных глубинах с последующей оценкой агрохимического состояния грунта, состава воды; определяются содержание нефтепродуктов, наличие минеральных веществ (азота, фосфора, калия), величина водородного показателя среды, а также в специально отобранных образцах; проводят микробиологические исследования. Оценка уровня загрязнения проводится на основании лабораторных исследований; площадь и объем загрязнения определяются по топографическим планам, построенным либо инструментально, либо глазомерно. Отбор проб почв, грунта и воды осуществляется по принятым методикам.

Аналогичная ситуация имела место в северной части, в пределах Онего-Двинско-Мензенской равнины Архангельской области Котласского района на объекте транспортного комплекса, где были проведены технологические работы по очистке почвы, поверхностных и подземных вод, пород зоны аэрации, загрязненных нефтепродуктами.

В процессе обследования в указанном районе были осуществлены следующие виды работ:

- рекогносцировочное обследование основного склада горюче-смазочных материалов (ГСМ) и прилегающих к нему территорий для фиксации поверхностных признаков загрязнения нефтепродуктами;

- проходка горных выработок (шурфов, скважин и траншей) для уточнения геологического разреза, уточнения положения уровня подземных вод, определения глубины залегания, мощности и площади распространения подземного загрязнения нефтепродуктами, а также для проведения опытно-фильтрационных работ;

- проведение опытно-фильтрационных работ, заключающихся в выполнении откачки нефтепродуктов и воды из шурфов и траншей и в наблюдениях за последующим восстановлением уровней. Эти работы позволяют оценить фильтрационные свойства грунта;

- периодические замеры уровней грунтовых вод и гравитационно-подвижных нефтепродуктов для отслеживания динамики колебаний этих уровней во времени;

- отбор проб грунтов и воды с поверхности и из горных выработок для уточнения наличия и степени загрязнения грунтов и подземных вод, исследования свойств и состава грунтов, воды и нефтезагрязнений;

- топогеодезические работы по составлению необходимых карт, планов и схем.

Объект очистки представлял собой основной склад ГСМ, где на обследованной площади 4,8 га обнаружены загрязнения нефтепродуктами поверхностного слоя (почвы) площадью 2 га и подземная линза загрязнения нефтепродуктами площадью 3,6 га. Объект был расположен на равнине с уклоном поверхности 0,3° (по данным нивелировки). Грунты, слагающие территорию склада ГСМ, представлены супесями,

плотными, серо-коричневыми, водно-ледникового происхождения, отнесенными по возрасту к московскому оледенению.

Нефтезагрязнения на основном складе ГСМ представляли собой: на 95% — смесь легких углеводородов, соответствующих по фракционному составу дизельному топливу; на 5% — битумы, тяжелые масла и продукты окисления, придающие смеси характерный грязно-коричневый цвет.

Линза нефтезагрязнений залегала на глубине до 1 м; грунты над нею представляли собой зону аэрации, также загрязненную нефтепродуктами и нефтешламами.

Подстилали линзу грунтовые воды.

Таким образом, на территории склада ГСМ были загрязнены нефтепродуктами почва, породы зоны аэрации и грунтовые воды.

На основном складе ГСМ и в его окрестностях было обследована территория площадью 4,8 га. Нефтешламы были зафиксированы в виде линзы площадью 3,6 га, залегающей в толще грунтов на подземных водах.

Глубина залегания нефтезагрязнений колебалась в зависимости от колебаний уровня подстилающих их грунтовых вод, но в основном составляла около 1 м.

Концентрация нефтешламов в грунтах, определенная методом газожидкостной хроматографии по 303 пробам, отобранным в 208 точках, колебалась от 1,3 до 38,0 г/кг, а в среднем составляла 19,5 г/кг.

Просачиваясь в подземную линзу, нефтепродукты загрязняли поверхностный слой грунтов. Площадь поверхностного загрязнения, определенная по данным обследования, составила 2 га.

Толщина слоя нефтепродуктов в подземной линзе составляла в среднем 0,4 м.

Ориентировочный объем загрязненных грунтов оценивался в 36000 м³.

Оценка химического состояния очищаемой территории давалась на основании анализа естественного содержания в отобранных образцах основных элементов питания микроорганизмов: азота и фосфора. Дополнительно исследовалась реакция среды (рН). На основании полученных результатов по исследованным образцам среднее содержание аммония (NH₄) составляло 0,003 г/кг; пятиоксида фосфора (P₂O₅) — 0,002 г/кг; рН среды — 7,1.

Микробиологическое состояние загрязненной территории характеризовалось наличием естественных форм углеводородоокисляющих микроорганизмов. Для количественной оценки микрофлоры и выделения штаммов-деструкторов углеводородов (то есть отдельных конкретных видов микроорганизмов, разрушающих нефтепродукты) использовалась техника поверхностного посева на специальную питательную среду — агар.

Качественная характеристика нефтепродуктов давалась на основании хроматографического анализа исходных образцов почвы, грунта и воды.

Нефтезагрязнения почвы и воды характеризовались углеводородами с температурой кипения 110 ... 250 °С с пиком на 140 ... 180 °С.

Как показал отечественный и зарубежный опыт, очистку почвы и грунта целесообразно вести до

концентрации нефтепродуктов на уровне 3 г/кг. Такая концентрация не угнетает рост растений и микробиологические процессы в грунте и почве [1–5].

Основные технические решения принимались в соответствии с комплексной технологией, приведенной на рис. 1.

Обязательными этапами работ являлись:

- I. Оценка, объема, площади и степени загрязнения.
- II. Локализация нефтезагрязнений и устранение вызывающих их причин.
- III. Очистка территории от нефтезагрязнений.
- IV. Микробиологический и химический контроль за процессом очистки.
- V. Рекультивация территории.

В работе [4] описываются аналогичная аварийная ситуация, вызванная железнодорожным аварийным разливом фенола в 1986 г. на станции Падар Гаджигабулского района Азербайджана, и разработанные для устранения последствий аварии мероприятия. Произошел разлив фенола из сошедшей с рельсов железнодорожной цистерны. Детоксикацию почвогрунта в этом случае проводили самыми доступными методами — вручную: лопатами и специальной техникой,

что не позволило осуществить полное восстановление нарушенной территории.

Локализация нефтезагрязнений и фенолов должна проводиться с целью предотвращения распространения нефтепродуктов и фенолов по рельефу или по зеркалу подземных и поверхностных вод. Для предотвращения растекания нефтепродуктов и фенолов по рельефу местности в этом случае была применена обваловка из местного грунта, возводимая вокруг образовавшихся разливов с применением тяжелой техники. Внутри обваловки нефтепродукты связывались сорбентами. В качестве сорбентов в летнее время целесообразно использовать мелкодисперсный торф, в зимнее время — вспученный вермикулит. Оба материала являются естественными и экологически чистыми.

В проточных водоемах локализация нефтезагрязнений и фенолов проводилась по традиционной схеме. Перегораживалась верхняя часть течения водотока плотинами для удержания нефтепродуктов. В качестве плотин использовались доски, погруженные на 10 ... 15 см в глубину водотока и возвышающиеся над уровнем воды на 10 ... 15 см. Такие заграждения устанавливались в местах сужения водотока на всю

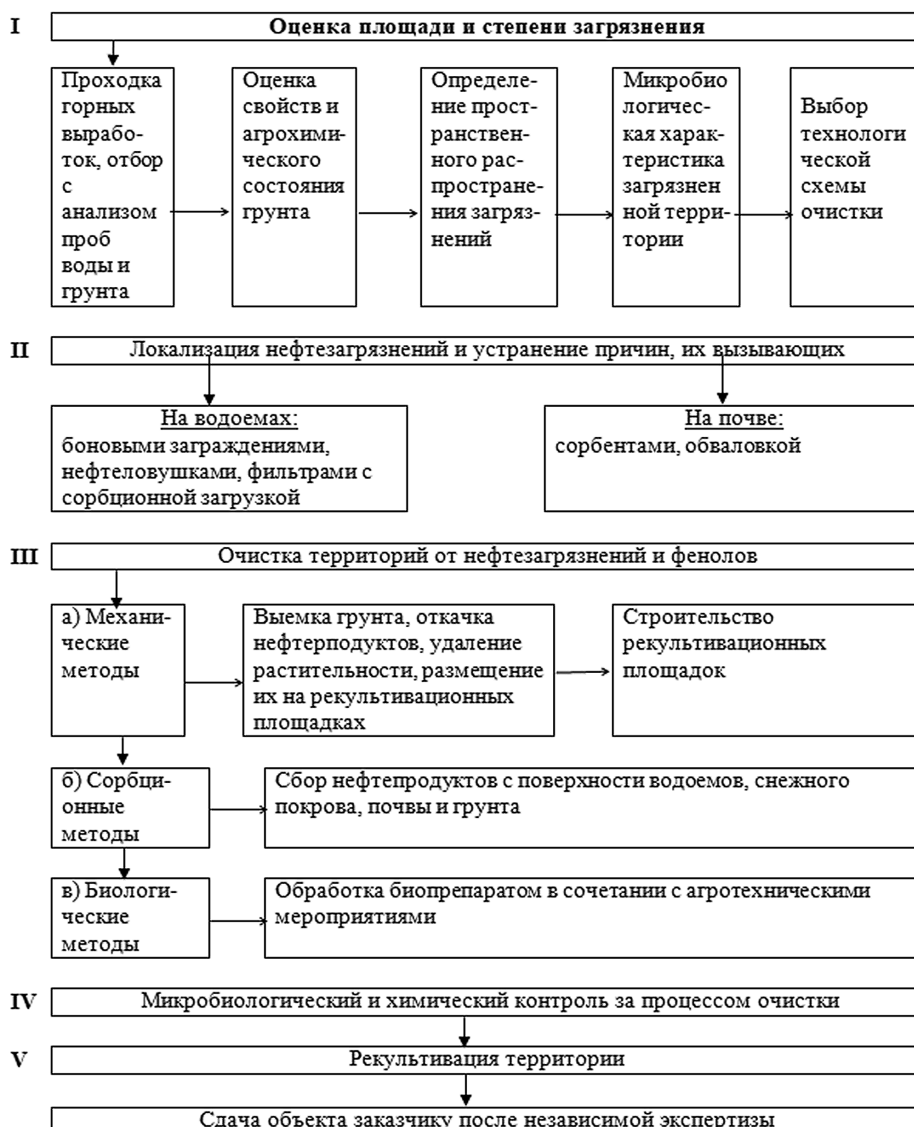


Рис. 1. Основные этапы работ по очистке от фенола и нефтезагрязнений

его ширину. При невозможности полного перекрытия потока устанавливались доски или бонны под углом к водотоку, один конец которых закреплялся на берегу, другой — удерживался якорем (грузом) на дне. В случае, если одна перегородка не удерживала весь поток нефтепродуктов, устанавливали дополнительные заграждения ниже по течению. Для перехвата нефтепродуктов и фенолов, движущихся по дну или во взвешенном состоянии, поток перегородивался шандорами (шандор — это металлический или деревянный короб, заполненный сорбентом, обеспечивающий проход воды, но удерживающий нефтепродукты и фенол).

В непроточных водоемах при значительных их размерах нефтезагрязнения и фенол локализовывались бонами или досками, расположенными по периметру пятна загрязнения.

Для локализации подземных нефтезагрязнений создавалась система перехватывающих поток горных выработок (скважины, шурфы, траншеи) либо создавались гидродинамические завесы.

В состав комплексной технологии очистки территории от нефтезагрязнений и фенолы, как указывалось выше, входят различные методы очистки территории: механические, сорбционные, биологические [5–14].

Этап химического и микробиологического контроля за процессом очистки является одним из важнейших в процессе очистки, так как при использовании биопрепаратов возникает необходимость внесения большого количества минеральных солей [15]. При этом максимальная скорость окисления нефтепродуктов и фенолов достигается при оптимальном соотношении углерода: фосфора, азота, калия, что позволяет обеспечить постоянный химический и микробиологический контроль.

Окончательный этап восстановительных работ — рекультивация — проводится при необходимости.

Для выполнения рекультивации на заключительном этапе на территории, очищенной до концентрации нефтепродуктов не более 3 г/кг, высевают растения — сидераты (вико-овсяная смесь, вико-ячменная смесь, овес кормовой и т.д.). Одновременно используют биопрепараты, предназначенные для увеличения плодородия и защиты от фитопатогенных микроорганизмов — возбудителей болезней растений.

Локализация нефтезагрязнений таким образом сводится прежде всего к предотвращению пространственного распространения углеводородов, которые в силу своей подвижности легко перемещаются при малейших изменениях напорного градиента. А напорный градиент для нефтезагрязнений находится

в теснейшей зависимости от уровня грунтовых вод, который, в свою очередь, постоянно изменяется под воздействием изменения метеорологической обстановки (снеготаяние, выпадение жидких осадков, засушливые периоды и т.д.).

Для предотвращения пространственного распространения нефтепродуктов необходимо перехватить подземные потоки жидких углеводородов на всю ширину. Для этой цели следует устроить сплошную траншею поперек основных направлений движения нефтепродуктов и фенолов.

Конкретное место заложения этой траншеи и ее форма в плане корректируются в зависимости от расположения трубопроводов, кабелей, подъездных дорог и других действующих сооружений и коммуникаций (рис. 2).

Поперечное сечение траншей, как уже упоминалось выше, выбирается, исходя из необходимости нормального размещения и обслуживания насосного оборудования. Этому условию вполне удовлетворяет стандартное сечение с шириной по низу 1 м. В этом случае площадь поперечного сечения составляет 1,5 м².

В работе [4] был предложен разработанный метод химической инактивации фенола, основанный на переводе его в фенолят кальция (малорастворимое в воде соединение) с последующей иммобилизацией фенола в продуктах обезвреживания почвогрунта.

Сущность разработки заключается в использовании в обезвреживающем составе природного бентонита, приводящего к нейтрализации гидратной извести с образованием гидрофобного силиката (алюмината) кальция. Это повышает надежность иммобилизации фенола и допустимый для природной среды интервал pH водной вытяжки из продуктов обезвреживания от 6,5 до 8,5.

Широкое распространение получили методы биологической очистки сточных вод и почв бактериальными биодеструкторами [5, 6, 12, 13–15].

При этом должна осуществляться оценка динамики восстановления рекультивированных нефтезагрязненных земель [16].

Заключение

При проведении очистки от фенолов и нефтезагрязнений необходимо

применять основные этапы работ по очистке (оценка объема, площади и степени загрязнения; локализация нефтезагрязнений и устранение

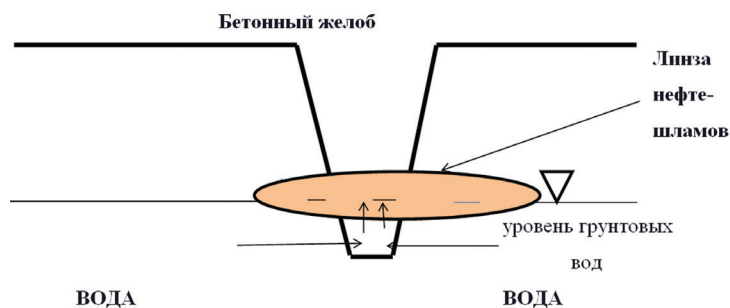


Рис. 1. Основные этапы работ по очистке от фенолов и нефтезагрязнений

вызывающих их причин; очистка территории от нефтезагрязнений; микробиологический и химический контроль за процессом очистки; рекультивация территории).

Рекомендовать, как наиболее простой и доступный, метод химической инактивации фенола, основанный

на переводе его в фенолят кальция, приводящий к нейтрализации гидратной извести.

3. Рассмотренные в статье технологии и методы очистки территорий от нефтезагрязнений и фенолов позволят обеспечить необходимую подготовку территории и водных объектов для дальнейшей эксплуатации.

Литература

- Ольховикова Н. Ю., Осташ С. В. Информационно-аналитическая система контроля локализации и обработки фенолсодержащих сред // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Сб. трудов XII Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 113-121.
- Чурсина М. Е., Околелова А. А., Егорова Г. С. Оценка загрязнения почв фенолами // Устойчивое развитие территорий: теория и практика: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х томах. 2019. С. 282-284.
- Сычева Е. В. Критерии оценки экологического риска воздействия фенолов на водную экосистему // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2008. № 3. С. 256-261.
- Гасанов Р.К., Абдуллаев Ф.З., Гасанов К.С., Валиев В.Г., Абдуллаев А. Ф. Ликвидация последствий аварийного разлива фенола // В сб.: Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии: Материалы Международной научной конференции. 2015. С. 162-167.
- Перспективы повышения эффективности биологической очистки сточных вод и почв бактериальными биодеструкторами: Монография / И. В. Владимцева, В. М. Самыгин, О. В. Колотова и др.; Минобрнауки РФ, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград: Волгоградский государственный техн. университет. 2016. 79 с.
- Кочеткова Е.А., Соколова И.В., Шмелева Е.О., Забубенина Е.А. Использование микроорганизмов-деструкторов для биоремедиации от загрязнений фенолами // Инновационные технологии и технические средства для АПК: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов / Под общ. ред. Н.И. Бухтоярова, Н.М. Дерканосовой, В. А. Гулевского. 2016. С. 15-19.
- Шувалов Ю. В., Синькова Е. А., Кузьмин Д. Н. Очистка грунтов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. № 12. С. 107-117.
- Годсповер А. О. Эколого-экономическое обоснование выбора технологий по рекультивации загрязненных земель нефтепродуктами // Экономика природопользования. 2018. № 3. С. 22-37.
- Тишин А. С., Тишина Ю. Р. Сравнение зарубежного и отечественного опыта в очистке почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 10 (112). Ч.1. С. 1060150-112.
- Темерев С.В., Бриль Т.А. Количественное определение фенолов в поверхностных водах // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Материалы III Всерос. науч. конф. Томск, 2-4 сентября 2004 г. Томск, 2004.
- Болтовский А. В., Габричидзе Т. Г., Кузнецов Н. П., Смышляев А. А., Семенота В. В. Некоторые аспекты экологической безопасности государства // Экология промышленного производства. 2017. № 1. С. 54-62.
- Поварова Л. В. Анализ применения биотехнологий для очистки различных загрязнений окружающей среды // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2019. № 1. С. 190-206.
- Степанова Н. Е. Инновационные технологии в рекультивации нефтезагрязненных земель // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в современных экономических условиях: Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград, 2021. С. 361-365.
- Кузнецов А.Е., Градова Н.Б., Лушников С.В., Энгельхарт М. Прикладная эковиотехнология: в 2-х т.: Учеб. пособие, Т. 1,2. Изд. «Лаборатория знаний», 2020. Т.1. 629 с.; Т. 2. 485 с.// URL: <https://e.lanbook.com/book/152034/>.
- Разумкова Г. М. Биотехнологические методы борьбы с загрязнением окружающей среды нефтью и нефтепродуктами // VII Лужские научные чтения. Современное научное знание: теория и практика: Материалы Международной научной конференции / Отв. ред. Т. В. Седлецкая. 2019. С. 25-27.
- Иванов В. Б., Александрова В. В., Якупов Р. О., Медведева А. И., Иванова А. В. Оценка динамики восстановления рекультивированных нефтезагрязненных земель // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2019. Т. 11. № 2-2. С. 21-30.

Сведения об авторе

Пашинин Валерий Алексеевич: д.т.н., проф., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), с. н. с. науч.-исслед. отдела; проф. каф. «Химия и инженерная экология» ФГАУ ВО «Российский университет транспорта». Москва, Россия. SPIN-код: 4277-4056.

Ульянова Оксана Алексеевна: аспирант, ФГАУ ВО «Российский университет транспорта», ассистент. Москва, Россия. SPIN-код: 9010-0271.

Татаринов Виктор Викторович: к. физ.-мат. н., доц., МГТУ им. Н.Э. Баумана, доц. кафедры. Москва, Россия. SPIN-код: 3056-0191.

Косырев Павел Николаевич: к. т. н., с. н. с., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), в. н. с. науч.-исслед. отдела. Москва, Россия. SPIN-код: 6708-2678.

Недорчук Борис Лаврентьевич: к. т. н., доц., лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, ФГАУ ВО «Российский университет транспорта», доц. кафедры. Москва, Россия. SPIN-код: 8183-3971.

About the authors

Pashinin Valery A.: ScD (Technical Sc.), Professor, VNIIGoChS (FC), Senior Researcher, Research Department; Professor of the Department of Chemistry and Engineering Ecology, Russian University of Transport. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 4277-4056.

Ulyanova Oksana A.: Graduate Student, Russian University of Transport, Assistant. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 9010-0271.

Tatarinov Viktor V.: PhD (Physical and Mathematical Sc.), Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Associate Professor of the Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 3056-0191.

Kosyrev Pavel N.: PhD (Technical Sc.), Senior Researcher, VNIIGoChS (FC), Leading Researcher, Research Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 6708-2678.

Nedorchuk Boris L.: PhD (Technical Sc.), Associate Professor, Laureate of the Government of the Russian Federation Prize in the field of science and technology, Russian University of Transport, Associate Professor of the Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 8183-3971.