

Copyright © 2023 by Cherkas Global University



Published in the USA  
Biogeosystem Technique  
Issued since 2014.  
E-ISSN: 2413-7316  
2023. 10(2): 51-65

DOI: 10.13187/bgt.2023.2.51  
<https://bgt.cherkasgu.press>



## Articles

### Technology for Phytoremediation of Oil-Contaminated Dense Soil

Alla A. Okolelova <sup>a</sup>, Ksenia G. Tutarashvili <sup>a</sup>, Veronika N. Kaplya <sup>a</sup>, Galina S. Egorova <sup>b</sup>,  
Abbas Yousif Abdul Abbas <sup>c</sup>, Elena E. Nefed'eva <sup>a,d,\*</sup>, Sergey L. Belopuhov <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

<sup>b</sup> Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

<sup>c</sup> Al-Gharraf oil field, Dhi Qar, Iraq

<sup>d</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Paper Review Summary:

Received: 2023, December 21

Received in revised form: 2023, December 25

Acceptance: 2023, December 27

#### Abstract

The study was aimed to develop a technology for effective and safe cleaning and phytoremediation of heavily rocky oil-contaminated soil. The use of mechanical cleaning technology seemed rational, since it did not require special costs for soil removal and its transportation. Surfactants and other substances are used to clean soil from oil contamination. It was proposed to use surfactants intended for widespread use in industry because they sufficiently studied and available. Sokolan surfactant and defoamer AF 5503 were the least toxic for further soil remediation. The technology for cleaning of oil-contaminated soil involves their introduction into the apparatus for more efficient separation of oil components from contaminated soil. The preparations will not contribute to the toxicity of wastewater and washed soil during further remediation of the fertile soil layer. The use of green manure can improve the condition of soils and create prerequisites for the development of microflora involved in the transformation of oil products in the soil. Oil has a detrimental effect on the growth dynamics of sunflower cotyledons and stems.

Mustard seeds showed the best germination. In addition, wheat, amaranth, oats and barley survived in oil-contaminated soil, and they can be used for phytoremediation. Mustard and oats are better adapted to the conditions of heavily stony, oil-contaminated soil. It is recommended to simultaneously sow oats and white mustard into the straw. It is necessary to carry out pre-sowing treatment of seeds with the solution of Lignohumate brand B potassium, consumption rate is 0.5 l/t, working solution consumption is 10-15 l/t. The seed material treatment will significantly enhance the growth and development of the plant root system in the first stages of ontogenesis. It is not recommended to apply mineral fertilizers before sowing, but fertilizing with mineral

\* Corresponding author

E-mail addresses: [nefedieva@rambler.ru](mailto:nefedieva@rambler.ru) (E.E. Nefed'eva)

fertilizers can be carried out during the growing season. It is possible to use the solid fraction of municipal wastewater as organomineral fertilizers.

**Keywords:** *Triticum aestivum*, *Avena sativa*, *Hordeum vulgare*, *Sinapis alba*, *Amaranthus albus*, rocky soil, soil washing in drums, surfactants.

## 1. Введение

Нефть и продукты ее переработки являются распространенными поллютантами (Abdulkarim, Abdulla, 2022). Нефтяные загрязнения обнаруживаются в водных объектах, почвах, легкие фракции при разливах улетучиваются в атмосферный воздух. Самоочищение биосферы от нефтезагрязнений происходит благодаря микроорганизмам-нефтедеструкторам (Колотова, 2020; Желтобрюхов, 2016), за счет испарения, растекания, абиогенного окисления и других процессов. Однако, деградация нефтепродуктов в природе протекает медленно (Околелова, 2020).

У почвы, загрязненной нефтепродуктами, снижается плодородие как из-за токсичности нефтепродуктов (Okolelova et al., 2021), так и из-за создаваемого ими анаэробного биоцида (Околелова, 2022 а; Желтобрюхов, 2019). Затруднительна корректная оценка содержания нефтепродуктов в почве (Okolelova et al., 2020). Одним из результатов нефтяного загрязнения почвы будет угнетение растений на данной территории (Tutarashvili et al., 2021, Желтобрюхов, 2016).

Известно множество способов очистки и ремедиации нефтезагрязненных почв, в том числе с помощью механических, физико-химических, биологических и агрохимических методов, которые выбираются с учетом количества и состава загрязнителя, а также особенностей загрязненной территории (Michael-Igolima et al., 2022).

Метод механической очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей считается одним из недостаточно изученных и, следовательно, перспективных. Применение технологии механической очистки в данном случае затруднительно и требует особого подхода из-за прочности грунта.

Рекультивация – это комплекс работ, направленный на восстановление продуктивности нарушенных земель, а также на улучшение условий окружающей среды. Под рекультивацией понимается комплекс мер, направленных на восстановление природных объектов, нарушенных в результате природнохозяйственной деятельности человека. Процесс удаления разлитой нефти и нефтепродуктов требует довольно сложной технологии как при подготовке загрязненного участка к рекультивации, так и при проведении самого процесса (Околелова, 2022b).

Анализ литературных источников позволил определить наиболее перспективные направления и исследования и реализовать их в экспериментальной работе, а именно предложить наиболее перспективный метод очистки сильнокаменистого грунта, которым является механическая очистка с изъятием загрязненной почвы и последующей очисткой.

В задачу исследования входила разработка метода очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей. Применение технологии механической очистки представляется в данном случае рациональным, поскольку не требует особых затрат на изъятие почвы и ее транспортировку. Минимизация объема изъятых материалов позволяет оптимизировать объем транспортируемых материалов. Следует иметь в виду, что изъятие земель может вызвать искажение морфологической структуры обрабатываемого участка и нарушения течения как поверхностных, так и подземных вод. Тем не менее, изоляция и обработка загрязненных материалов вне участка позволяют применять более сложные приемы обработки, которые могут быть более эффективными и быстродействующими, а также более безопасными для грунтовых вод, животного и растительного мира, местных жителей.

Цель настоящего исследования – на основе теоретических и экспериментальных исследований предложить технологию эффективной и безопасной очистки и фиторемедиации сильнокаменистого нефтезагрязненного грунта.

В связи с выбранной технологией очистки сильнокаменистого грунта необходимо выполнить следующие задачи исследования:

1. Разработка технологии механической очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей.
2. Оценка возможности применения ПАВ и пеногасителей при очистке грунта от нефтезагрязнителей.

3. Оценка качества полученного продукта.
4. Предложение мероприятий по рекультивации сильнокаменистого грунта.

## 2. Методика исследований

Семена твердой пшеницы и ярового ячменя обрабатывали пеногасителем Af 5503, Пента и ПАВ *Sokolan* по схеме: доза препарата составляла 0 (контроль); 50; 100; 250 г/т семян.

Af 5503 применяется в качестве антивспенивателя (пеногасителя), формула  $C_4H_9O.(C_3H_6O)_n$ .

Пеногаситель «Пента» 465 – самоэмульгирующийся пеногасящий концентрат кремнийорганических олигомеров с добавлением ПАВ. Кремнийорганические олигомеры образуют пространственную структуру блок-сополимера, в которых наличие связей химических связей между блоками обуславливает их устойчивость и предотвращает расслоение с выделением отдельных компонентов. Пеногаситель растекается по поверхности пенной пленки и выталкивает из нее слой жидкости, вызывая утончение пленки вплоть до ее разрыва. Растекание по поверхности обеспечивается благодаря введению ПАВ, образующие в воде дисперсии.

ПЭГ600 химическая формула:  $H(O-CH_2-CH_2)_n-OH$  – полиэтиленгликоль, является продуктом полимеризации окиси этилена с этиленгликолем. Используется в фармакологии, косметологии, в производстве моющих средств, текстильной, каучуковой, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности.

Исследовали влияние вышеперечисленных препаратов на всхожесть пшеницы мягкой озимой (*Triticum aestivum* L.) сорта Вестница и ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) сорта Донецкий 8, которую определяли по ГОСТ 12038-84 на 7 сутки. Зерновки проращивали рулонным методом в темноте при температуре 20°C. Эксперименты проводили в 4-кратной повторности.

К нормально проросшим относят семена, имеющие здоровый вид, имеющие не менее двух нормально развитых корешков размером более длины семени и росток размером не менее половины его длины с просматривающимися первичными листочками, занимающими не менее половины длины coleoptilya.

К непроросшим семенам относят набухшие семена, которые к моменту учета всхожести не проросли, твердые семена, которые не набухли и не изменили внешнего вида. К невсхожим семенам относят загнившие семена с разложившимся эндоспермом, почерневшим или загнившим зародышем и проростки с частично или полностью загнившими частями.

Аномально (ненормально) проросшие семена имеют нарушения в развитии проростков: нет зародышевых корешков или их меньше нормы, или они короткие, слабые, закрученные, водянистые; coleoptilya пустой, имеет трещину, короче листьев, деформированный, отсутствует; первичные листочки занимают меньше половины coleoptilya или обесцвечены, раздроблены или расщеплены, веретенообразные, водянистые, с короткими зародышевыми корешками.

Для проведения эксперимента по оценке токсичности компонентов нефти в грунте были подготовлены образцы каменистого сильно уплотненного грунта. Крупный гравий выкладывали на тонкий слой песка, затем засыпали смесью песка и цемента 1 : 5, увлажняли водой из пульверизатора, затем укладывали мелкий гравий. Во всех образцах уравнивали массу гравия, песка и цемента.

В контрольные образцы грунта не вносили нефть. В опытные образцы была добавлена сырая нефть с расчетом, чтобы ее концентрация составляла 3 г/кг грунта. Необходимый объем нефти тщательно перемешивали с чистым сухим речным песком и равномерно вносили в грунт. В контрольные образцы вносили чистый песок. Массу перска во всех образцах уравнивали.

На подготовленный грунт были посеяны семена пшеницы, подсолнечника, щиряцы, горчицы белой, ячменя, овса при различных условиях. Для улучшения условий культивирования в грунт были внесены важнейшие макроэлементы для питания растений. Эксперимент проводили в 4 повторностях. Результаты приведены в [Таблице 1](#).

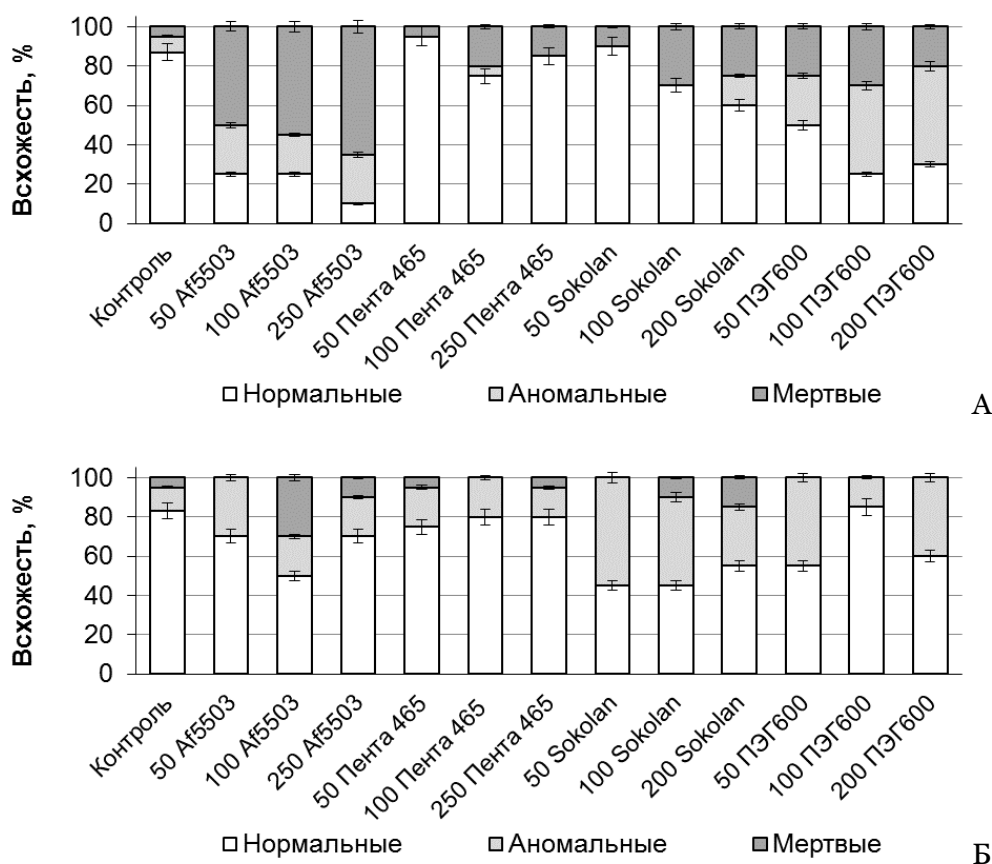
Результаты подвергали статистической обработке. Рассчитывали среднюю арифметическую ( $M$ ), среднее квадратическое отклонение, ошибку репрезентативности средней арифметической ( $m$ ), критерий Стьюдента. Оценку достоверности разницы

проводили с помощью сравнения полученного значения со стандартным  $t_{cm}$ . Результаты приведены на рисунках в виде  $M \pm m$ .

### 3. Результаты и обсуждение

ПАВы, сурфактанты и другие вещества используются для очистки почвы от нефтяных загрязнений (Rumin et al., 2022; Fanaei et al., 2020). Было предложено использовать ПАВы, применяемые для производства химических средств защиты растений, в связи с их достаточной изученностью и доступностью.

Необходимо отобрать наименее токсичные ПАВ и пеногаситель для промывки нефтезагрязненной почвы. На основании опытов сравнить ПАВ ПЭГ 600 и *Sokolan*, а также пеногасители AF 5503 и Пента 465. Наименее токсичные ПАВ и пеногаситель будут использованы в технологии очистки нефтезагрязненного сильнокаменистого грунта. ПАВ – химическое соединение, которое, концентрируясь на поверхности раздела термодинамических фаз, вызывает снижение поверхностного натяжения. Результаты представлены на [Рисунке 1](#) и [Рисунке 2](#).

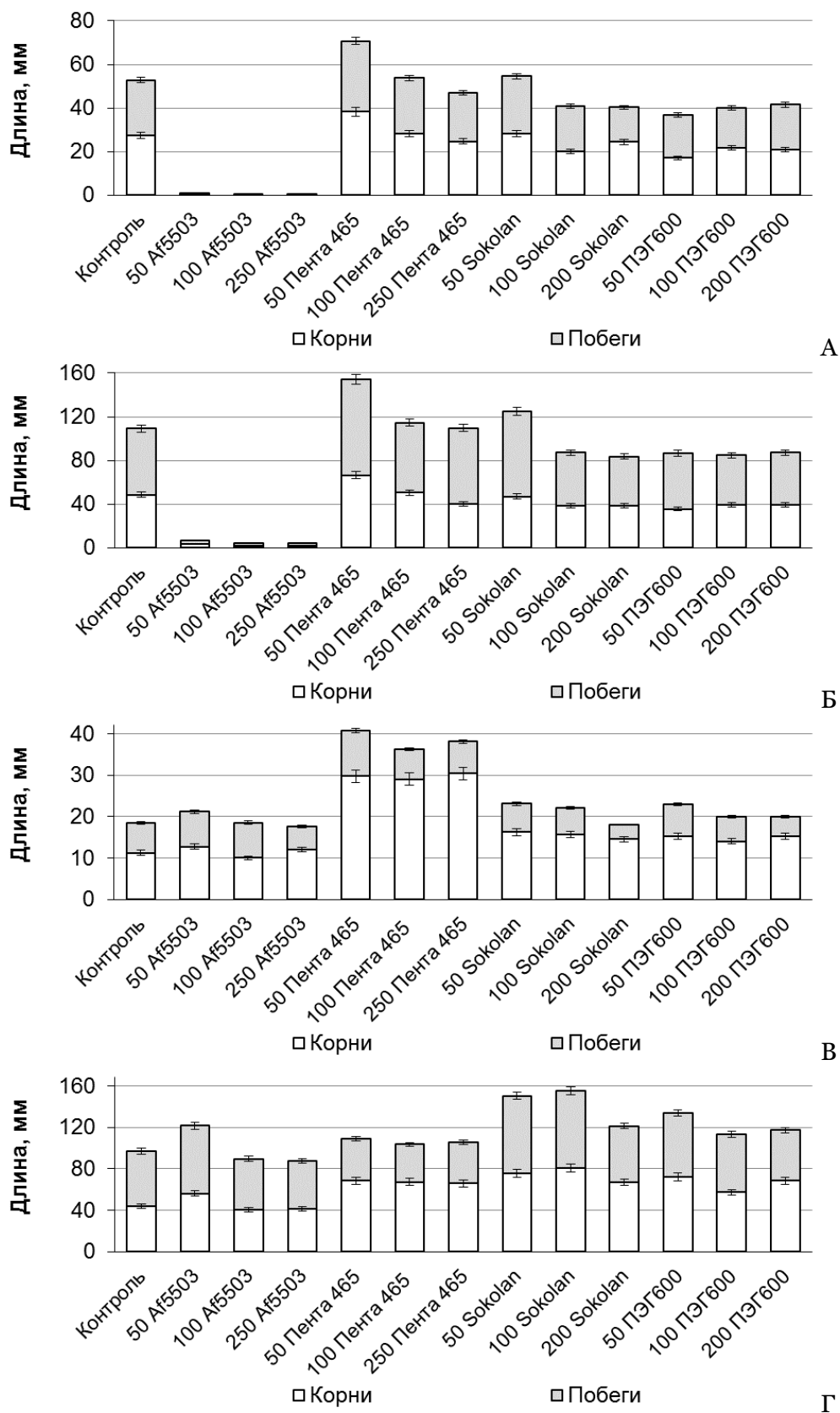


**Рис. 1.** Влияние пеногасителей AF 5503, Пента 465 и ПАВ ПЭГ 600 *Sokolan* на всхожесть пшеницы (А) и ячменя (Б)

Af 5503 не угнетал всхожесть ячменя. Положительно действовал на всхожесть, длину побегов и корней ячменя в дозе 50 г/т семян, однако влияние его было незначительно. Вместе с тем, Af5503 приводил к существенному торможению роста пшеницы, подавлению всхожести. Как правило, ячмень проявляет гораздо более выраженную устойчивость к химическим и прочим воздействиям, чем пшеница.

Пента 465 не защищал от потемнений, не угнетал всхожесть ячменя и пшеницы, не влиял на длину корней и побегов ячменя. В дозе 50 г/т семян пеногаситель стимулировал рост и прорастание семян пшеницы.

ПЭГ 600 может оказывать некоторое угнетающее действие по отношению к семенам пшеницы и, в меньшей степени, ячменя.



**Рис. 2.** Влияние пеногасителей AF 5503, Пента 465 и ПАВ ПЭГ 600, Sokolan на рост проростков пшеницы (А – 3 сут, Б – 7 сут) и ячменя (В – 3 сут, Г – 7 сут)

ПАВ *Sokolan* положительно влиял на всхожесть, длину побегов и корней пшеницы (оптимальная доза 50 г/т семян). *Sokolan* не приводил к торможению роста ячменя, но и не способствовал его явной стимуляции.

На основании проведенных экспериментальных исследований ПАВ *Sokolan* и пеногаситель AF 5503 являются менее токсичными для дальнейшей рекультивации почв. Исследуемые ПАВ и пеногасители предназначены для широкого использования в промышленности. Технология очистки нефтезагрязненного грунта предусматривает их введение в аппарат. Это будет способствовать более эффективному отделению компонентов нефти от загрязненного грунта и облегчит процесс промывки. Препараты *Sokolan* и AF 5503 не будут вносить вклад в токсичность сточных вод и отмытого грунта при дальнейшей рекультивации плодородного слоя почвы.

Ассортимент растений, применяемых для рекультивации нефтезагрязненного грунта, следует составлять, опираясь на теоретические (Nefed'eva et al., 2020; Abdallah et al., 2022; Тутарашвили, 2021, Obi-Iyeke, 2022) и экспериментальные данные. Применение сидератов позволяет улучшить состояние почв и создать условия для развития микрофлоры, участвующей в трансформации нефтепродуктов в почве (Капля, 2023; Kaplya et al., 2022; Нефедьева, 2017; Lopez-Echartea et al., 2020).

Лучшую всхожесть спустя 2 недели после посева показали семена горчицы в сравнении чистого и загрязненного нефтью грунта (Таблица 1).

**Таблица 1.** Выживаемость семян на каменистом сильно уплотненном грунте

Культура	Контроль		Грунт, загрязненный нефтью		НСР
	2 недели	4 недели	2 недели	4 недели	
Пшеница	50,0	55,0	35,0	65,0	0,5
Горчица белая	56,1	62,7	66,0	62,7	0,5
Подсолнечник	100,0	100,0	50,0	50,0	0,7
Щирица	52,8	52,0	51,6	50,8	0,4
Овес	70,0	70,0	65,0	65,0	0,6
Ячмень	62,7	62,5	61,9	66,0	0,6

Нефть, присутствующая в почве, оказывает пагубное влияние на динамику роста семядолей и стебля подсолнечника. Спустя 4 недели (Таблица 1) зерновки пшеницы продолжали прорастать, причем на нефтезагрязненном грунте их прорастание замедлилось, а выживаемость не снизилась. Высокую чувствительность к нефти проявил только подсолнечник. Остальные виды можно использовать для ремедиации нефтезагрязненных грунтов после предварительной очистки.

Для проведения второй части эксперимента был подготовлен сильнокаменистый грунт (Рисунок 3) по аналогичной методике, а также был использован для сравнения торф.

Половину образцов грунта оставляли без внесения нефти, в другие образцы были внесены нефтепродукты (сырая нефть), чтобы ее концентрация составляла 3000 мг/кг грунта. На подготовленный грунт были высеяны семена горчицы, овса, пшеницы, ячменя при различных условиях. Для улучшения условий культивирования в каменистый грунт были внесены раствор Гельригеля, содержащий важнейшие макроэлементы, лигногумат калийный Марка Б 1 л/га (ООО «Агро Эксперт Групп), Фертикс Марка А 1 л/га (ООО «Агро Эксперт Групп), пшеничная солома и препарат на основе природного минерала бишофита УГ 200 мл/га.

Эксперимент показал (Рисунок 4), что горчица и овес лучше приспособились к условиям сильнокаменистого грунта и загрязненной нефтью почве. Рекомендован одновременный высев в солому овса и горчицы белой. Эти растения обладали высокой устойчивостью и показали наилучшие результаты в модельном опыте.



**Рис. 3.** Внешний вид модельного сильнокаменистого грунта



**Рис. 4.** Внешний вид растений, выращенных на нефтезагрязненном грунте\*

\* 1 ряд слева направо: контроль грунт, контроль грунт + нефть, гравий + раствор Гельригеля, гравий + раствор Гельригеля + нефть;

2 ряд слева направо: гравий+лигногумат Марка Б, гравий+лигногумат Марка Б + нефть, гравий+ Фертикс Марка А, гравий+ Фертикс Марка А + нефть

3 ряд слева направо: гравий + солома, гравий + солома + нефть, гравий + УГ, гравий + УГ + нефть

Для создания благоприятных условий для семян, в рекультивируемый грунт следует вбить деревянные колышки на расстоянии 1 м друг от друга, между колышками разместить ветки деревьев лиственных пород, а среди них уложить солому рыхлым слоем. Растительный материал следует увлажнить.

Следует провести предпосевную обработку семян препаратом Лигногумат марка Б калийный, норма расхода – 0,5 л/т. Расход рабочей жидкости 10-15 л/т. Благодаря высокому стимулирующему эффекту обработка посевного материала позволит значительно усилить рост и развитие корневой системы растений на первых этапах роста. Перед посевом не следует вносить минеральные удобрения, но можно провести подкормку минеральными удобрениями во время вегетации.

В качестве органоминеральных удобрений возможно использовать твердую фракцию городских бытовых сточных вод (Нефедьева, 2013).

### 3.1. Технологическая часть

Для очистки грунта был выбран механический метод, а именно, механический способ очистки грунта с частичной промывкой и последующей рекультивацией путем нанесения плодородного слоя почвы (Агеев, 2016). Более эффективным способом очистки почвы от гидрофобных загрязнителей является ее промывание в барабанах с использованием ПАВ. После промывки грунт отстаивается в специальных емкостях и контейнерах, после чего осуществляется его разделение.

На основании проведенных экспериментальных исследований ПАВ *Sokolan* и пеногаситель AF5503 являются менее токсичными для дальнейшей рекультивации почв и добавляются в воду для частичной промывки почвы.

Было выявлено, что такие растения-сидераты как горчица и овес наиболее приспособлены к условиям сильнокаменистого грунта, что необходимо для дальнейшей рекультивации.

Проведен расчет материального баланса технологии. Расчет расхода сырья производится по выбранным параметрам технологического процесса, а также по потерям, которые были приняты для производства данного вида изделия. Расчет может быть произведен и для производства в целом, и по отдельным его стадиям.

Для полного учета всех потерь мы начали расчет материального баланса с последней стадии:

$$\frac{P_i}{1 - S_i} = N_i$$

$P_i$  – масса вещества поступающая в данный этап;

$S_i$  – потери на данном этапе;

$N_i$  – масса веществ для расхода.

Стадия подготовки

На стадию подготовки поступает 1,016 т загрязненного грунта. Потери составили 1,5 %.

$$\frac{1.000}{0.985} = 1.016 \text{ т}$$

Потери составили 0,0160 т = 16 кг

Стадия очистки

На стадию очистки поступает 1,1044 т

Потери составили 8 %



$$\frac{1.016}{0.92} = 1.1044 \text{ m}$$

Потери составили 0,088 т = 88 кг

Стадия разделения фаз

На стадию разделения фаз поступает 1,1381

Потери 3 %

$$\frac{1.1044}{0.97} = 1.1381 \text{ m}$$

Потери составили 0,034 т = 34 кг

Материальный баланс технологии очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей приведен в [Таблице 2](#).

**Таблица 2.** Материальный баланс технологии очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей

Приход			Расход		
Статья прихода	Масса, кг	ω, %	Статья расхода	Масса, кг	ω, %
Стадия подготовки	1138		Стадия подготовки	34	3
Стадия очистки	1104		Стадия очистки	88	8
Стадия разделения фаз	1016		Стадия разделения фаз	16	1,5
Итого	$m_{исх}$	100	Итого	$m_{кон}$	100
	1138			1000	

#### Основной аппарат

Анализ технологии очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей показал, что необходим смеситель для стадии промывания почвы с водой и ПАВ. Подходящим смесителем для данной стадии является эжекторный гидросмеситель, так как он позволяет смешивать грунт с жидкостью с максимальной эффективностью. К преимуществам аппарата относится высокий уровень производительности, простота эксплуатации и монтажа, а также невысокие расходы.

Оценка технического решения с точки зрения экономической эффективности, энерго- и ресурсосбережения и экологической безопасности

Выбранная технология механической очистки сильнокаменистого грунта позволяет сохранить такие вторичные ресурсы как нефть, вода. В проведении работы нефтезагрязненный грунт проходит стадию очистки, затем происходит очистка воды от нефти и ПАВ, таким образом отделяется нефть, а затем вода очищается от примеси ПАВ и пеногасителей.

Для механической очистки сильнокаменистого грунта было предложено использование ПАВ Sokolan и ПЭГ600, а также пеногаситель – AF5503 и Пента 465. На основании проведенных экспериментальных исследований ПАВ Sokolan и пеногаситель AF5503 являются менее токсичными для дальнейшей рекультивации почв, эффективный способ повышения показателя плодородия почвы – использование растений-сидератов. Такие культуры богаты азотом, крахмалом, белками, что решит ряд проблем рекультивации плодородного слоя почвы.

В качестве основного аппарата был выбран эжекторный гидросмеситель, оборудование позволяет добиться высокой степени очистки путем промывки загрязненной почвы под высоким напором воды.

После стадии промывки загрязненная нефтью и ПАВ вода попадает на стадию очистки, где нефть вытесняется с помощью деэмульгаторов. Эти вещества применяются в дозах от 5 до 50 г на 1 тонну. Деэмульгаторы вытесняют ПАВ, содержащиеся в смеси нефтепродуктов и воды. Добавление деэмульгаторов позволяет разделить воду и нефтепродукты и обеспечить образование крупных капель нефтепродуктов. Такой способ

позволяет выделить до 95 % нефти.

Применяемое техническое решение является:

- экономически эффективным, так как введение выбранных ПАВ и пеногасителей позволяет сократить дополнительные расходы на промывку почвы, а также в предложенной технологии происходит выделение нефти из стоковой воды с помощью диэмульгатора;

- энерго- и ресурсоэффективным, так как использование ПАВ позволит сократить расходы воды на промывание почвы, а также очистка нефти с помощью диэмульгатора позволяет сохранить такой ресурс- как нефть;

- экологически безопасным, так как на основе проведенных экспериментальных исследований были выбраны наименее токсичные ПАВ, что позволит значительно быстрее восстановить плодородный слой почвы для последующего использования.

В предложенной технологии предусмотрена стадия разделения фаз, где отделенная сточная вода проходит стадию очистки и возвращается в производство. А отделенные в процессе сепарации камни (на входе мы имеем загрязненный сильнокаменистый грунт) хранится в емкостях, после чего может быть использован при строительстве дорог (на стадии засыпки).

Ресурсосбережение обеспечивается возвратом очищенной воды в производство, а также отделением нефтепродуктов. Образовавшаяся после очистки грунта и отделения нефтепродуктов вода возвращается в цикл очистки. Из полученного нефтешлама отделяются нефтепродукты, которые можно вторично использовать. Все это делает процесс более экономически эффективным и ресурсосберегающим. Сравнительная характеристика технологии очистки сильнокаменистого грунта представлена в [Таблице 3](#).

**Таблица 3.** Сравнительная характеристика технологии очистки сильнокаменистого грунта

<b>Параметр</b>	<b>Изначальная технология очистки сильнокаменистого грунта</b>	<b>Предложенная технология очистки сильнокаменистого грунта</b>
Энерго- и ресурсоэффективность	Грунт проходит стадию очистки, вода с примесями сбрасывается, а грунт возвращался на место сбора	Грунт после стадии очистки возвращается на место сбора, а загрязненная примесями (ПАВ, нефть) Нефть проходит стадию очистки с использованием диэмульгатора, после чего она практически не теряет своих свойств, вода поступает на стадию очистки и возвращается в производство
Экологическая безопасность	Грунт возвращается на место сбора	Грунт проходит стадию очистки с экспериментально выбранными наименее токсичными ПАВ, которые обеспечивают сокращение сроков ремедиации растениями-сидератами
Экономическая эффективность	–	Экономическая эффективность обеспечивается возвратом воды в производство, нефть после стадии очистки на выходе практически не теряет своих свойств. Гравий после стадии сепарации может использоваться в строительстве

Механический способ очистки грунта наиболее эффективен по сравнению с другими методами. При этом способе достигается высокая эффективность очистки для сильнокаменистого грунта. По сравнению с аналогами очистка грунта происходит быстрее и с наименьшим вредом для окружающей среды. На выходе грунт возвращается.

Для восстановления плодородного слоя рекомендованы растения-сидераты, такие как горчица белая и овес.

#### 4. Заключение

В данной работе описаны методы очистки сильнокаменистого грунта от нефтезагрязнителей. На основании проведенного анализа был выбран наиболее эффективный метод – метод механической очистки грунта. Достоинством данного технологического решения является выделение нефти в ходе очистки нефтезагрязненного грунта, при этом нефтепродукты могут быть выделены из нефтешлама.

Были проведены экспериментальные исследования для выбора наименее токсичных ПАВ и пеногасителей, используемых в производстве. На основании проведенных экспериментальных исследований определили растения-сидераты для последующей рекультивации почвы. Выбор растений для дальнейшего высева должен определяться на основании установления показателей аккумуляции тяжелых металлов в надземных частях растений и коэффициентов их переноса в системе «почва-корни-надземная часть растений» по максимальным значениям этих показателей.

Для восстановления естественного плодородия грунта рекомендовано внесение соломы и предпосевная обработка семян препаратом Лигногумат марка Б калийный (ООО «Агро Эксперт Групп»).

Достоинства предложенного метода заключаются в том, что повышается экономический показатель производства, то есть происходит увеличение качества очищенного грунта. Использование эффективных и наименее токсичных ПАВ позволяет получать грунт, который к последующей рекультивации растениями, а также использование диэмульгаторов при очистке позволяет сохранять до 95% нефти, что делает технологию экономически и ресурсо-эффективной.

В работе изучены теоретические основы выбранного способа, изучено влияние параметров процесса на получение заданного продукта. В соответствии с требованиями был выбран основной аппарат – эжекторный гидросмеситель. К преимуществам аппарата относится высокий уровень производительности, простота эксплуатации и монтажа, а также невысокие расходы.

#### 5. Благодарности

Статья выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с соглашением № 075-15-2022-317 от 20 апреля 2022 года о предоставлении гранта в виде субсидии из Федерального бюджета Российской Федерации. Грант предоставлен для государственной поддержки создания и развития Научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

The article was made with support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with agreement № 075-15-2022-317 date April 20. 2022 on providing a grant in the form of subsidies from the Federal budget of Russian Federation. The grant was provided for state support for the creation and development of a World class Scientific Center “Agrotechnologies for the Future”.

#### Литература

[Агеев и др., 2016](#) – Агеев А.В., Воронкова С.В., Рожков В.О. Патент № 2593386 С1 Российская Федерация, МПК В09С 1/00. Устройство для очистки грунтов и почвы от нефти и нефтепродуктов, 2016.

[Желтобрюхов и др., 2016](#) – Желтобрюхов В.Ф., Нефедьева Е.Э., Картушина Ю.Н. (2019). Растения в условиях загрязнения органическими соединениями. Проблемы фиторемедиации. Волгоград, 2016.

[Желтобрюхов и др., 2019](#) – Желтобрюхов В.Ф., Нефедьева Е.Э., Картушина Ю.Н. (2019). Растения в условиях загрязнения органическими соединениями. Проблемы фиторемедиации. Волгоград, 2019.

[Капля и др., 2023](#) – Капля В.Н., Околелова А.А., Егорова Г.С., Нефедьева Е.Э., Белопухов С.Л. (2023). Биоаугментация нефтезагрязненных почв // *АгроЭкоИнфо*. 2023. 6(60): 1. DOI: 10.51419/202136630

Колотова и др., 2020 – Колотова О.В., Нефедьева Е.Э., Могилевская И.В., Желтобрюхов В.Ф., Карпушина Ю.Н. Биодеструкция и биоремедиация. Волгоград, 2020.

Нефедьева и др., 2013 – Нефедьева Е.Э., Белицкая М.Н., Шайхиев И.Г. Возможности использования твердой фракции городских сточных вод в качестве органоминерального удобрения в городском и сельском хозяйстве // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. 16(19): 223-226.

Нефедьева и др., 2017 – Нефедьева Е.Э., Сиволобова Н.О., Кравцов М.В., Шайхиев И.Г. (2017). Доочистка сточных вод с помощью фиторемедиации // *Вестник Технологического университета*. 2017. 20(10): 145-148.

Околелова и др., 2020 – Околелова А.А., Желтобрюхо В.Ф., Нефедьева Е.Э., Егорова Г.С. Почвы урболандшафтов. Волгоград, 2020.

Околелова и др., 2022a – Околелова А.А., Егорова Г.С., Нефедьева Е.Э. Деградация, ремедиация и биоиндексация почв. Волгоград, 2022.

Околелова, Нефедьева, 2022b – Околелова А.А., Нефедьева Е.Э. Ремедиация почв. Волгоград, 2022.

Тутарашвили, Нефедьева, 2021 – Тутарашвили К.Г., Нефедьева Е.Э. Эффективность использования зеленых растений для ремедиации нефтезагрязненных почв / *Современные проблемы радиобиологии, радиэкологии и агроэкологии. IV Международная научно-практическая конференция*. 2021. С. 186-189.

Abdallah et al., 2022 – Abdallah A.H., Elhoussein A.A., Ibrahim D.A. Phytoremediation of crude oil contaminated soil using Sudanese plant species *Acacia sieberiana* Tausch // *International Journal of Phytoremediation*. 2022. 25(4):1-8. DOI: 10.1080/15226514.2022.2083575

Abdulkarim, Abdulla, 2022 – Abdulkarim T.I., Abdulla A.H. Experimental Approach for Treatment of Contaminated Soil with Crude Oil // *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*. 2022. 17(2): 273-277. DOI: 10.18280/ij dne.170214

Fanaei et al., 2020 – Fanaei F., Moussavi G., Shekoohiyan, S. Enhanced treatment of the oil-contaminated soil using biosurfactant-assisted washing operation combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-stimulated biotreatment of the effluent // *Journal of Environmental Management*. 2020. 271: 110941. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110941

Kaplya et al., 2022 – Kaplya, V.N., Okolelova, A.A., Nefedieva, E.E., Jabbarov, Z.A., Kováčik, P., Sukiasyan, A., Abdullaeva, Yu., Kholdorov, Sh., Demir, Z., Suska-Malawska, M. (2022). Diagnostics of the Content of Petroleum Products and Heavy Metals in Light Chestnut Soils // *Biogeosystem Technique*. 9(1): 3-14. DOI: 10.13187/bgt.2022.1.3

Lopez-Echartea et al., 2020 – Lopez-Echartea E., Strejcek M., Mukherjee S., Uhlik O., Yrjälä K. (2020). Bacterial succession in oil-contaminated soil under phytoremediation with poplars // *Chemosphere*. 2020. 243: 125242. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125242

Michael-Igolima et al., 2022 – Michael-Igolima Abbey, U.S.J., Ifelebuegu A.O. (2022). A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. // *Environmental Advances*. 2022. 9: 100319. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100319.

Nefed'eva et al., 2020 – Nefed'eva, E.E., Sevriukova, G.A., Zheltobryukhov, V.F., Gracheva, N.V., Abdulabbas, A.Yu.A. Assortment of herbaceous plants for remediation of soils contaminated with oil products and heavy metals / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "AGRITECH-II-2019: Agribusiness, environmental engineering and biotechnologies". 2020. 62008. DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062008

Obi-Iyeke, 2022 – Obi-Iyeke G. Screening of maize (*Zea mays* L.) for phytoremediation on crude oil contaminated soil // *FUDMA Journal of Sciences*. 2022. 6(3): 254-258. DOI: 10.33003/fjs-2022-0603-876

Okolelova et al., 2020 – Okolelova A.A., Zheltobryukhov V.F., Nefedieva E.E., Kaplya V., Merzlyakova A., Egorova G. (2020). Peculiarities of assessment of content of oil products in soils / *E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020*. 01100. DOI: 10.1051/e3sconf/202016101100

Okolelova et al., 2021 – Okolelova A.A., Nefed'eva E.E., Tutarashvili K.G., Egorova G.S., Zheltobryukhov V. F. Determination of the state of oil-contaminated soils / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Workshop on Innovations in Agro and Food Technologies (WIAFT-V-2021)*. 2021. 12093. DOI: 10.1088/1755-1315/848/1/012093

Rumin et al., 2022 – Rumin M., Lopatovskaya O., Stom D., Zhdanova G., Kupchinsky A., Petrova Yu. Change in capillary moisture capacity of oil-contaminated soil after washing with Tween-80 / III International Conference on Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture (EESTE2023). 2022. 3010. DOI: 10.1051/e3sconf/202346303010

Tutarashvili et al., 2021 – Tutarashvili K.G., Nefed'eva E.E., Okolelova A.A., Dronova T.N., Zheltobryukhov V.F. (2021). The plant resistance to oil contamination in soil / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Scientific Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies (AGRITECH-V – 2021). 2021. 022070. DOI: 10.1088/1755-1315/839/2/022070

## References

Abdallah et al., 2022 – Abdallah, A.H., Elhoussein, A.A., Ibrahim, D.A. (2022). Phytoremediation of crude oil contaminated soil using Sudanese plant species *Acacia sieberiana* Tausch. *International Journal of Phytoremediation*. 25(4): 1-8. DOI 10.1080/15226514.2022.2083575

Abdulkarim, Abdulla, 2022 – Abdulkarim, T.I., Abdulla, A.H. (2022). Experimental Approach for Treatment of Contaminated Soil with Crude Oil. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*. 17(2): 273-277. DOI: 10.18280/ijdne.170214

Ageev i dr., 2016 – Ageev, A.V., Voronkova, S.V., Rozhkov, V.O. (2016). Patent № 2593386 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B09C 1/00 [Patent No. 2593386 C1 Russian Federation, IPC B09C 1/00. A device for cleaning soil and soil from oil and petroleum products.]. *Ustroistvo dlya ochistki gruntov i pochvy ot nefti i nefteproduktov*. [in Russian]

Fanaei et al., 2020 – Fanaei, F., Moussavi, G., Shekoohiyan, S. (2020). Enhanced treatment of the oil-contaminated soil using biosurfactant-assisted washing operation combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-stimulated biotreatment of the effluent. *Journal of Environmental Management*. 271: 110941. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110941

Kaplya et al., 2022 – Kaplya, V.N., Okolelova, A.A., Nefedieva, E.E., Jabbarov, Z.A., Kováčik, P., Sukiasyan, A., Abdullaeva, Yu., Kholdorov, Sh., Demir, Z., Suska-Malawska, M. (2022). Diagnostics of the Content of Petroleum Products and Heavy Metals in Light Chestnut Soils. *Biogeosystem Technique*. 9(1): 3-14. DOI: 10.13187/bgt.2022.1.3

Kaplya i dr., 2023 – Kaplya, V.N., Okolelova, A.A., Egorova, G.S., Nefed'eva, E.E., Belopukhov, S.L. (2023). Bioaugmentatsiya neftezagryaznennykh pochv [Bioaugmentation of oil-contaminated soils]. *AgroEkoInfo*. 6(60): 1. DOI: 10.51419/202136630 [in Russian]

Kolotova i dr., 2020 – Kolotova, O.V., Nefed'eva, E.E., Mogilevskaya, I.V., Zheltobryukhov, V.F., Kartushina, Yu.N. (2020). Biodestruktsiya i bioremediatsiya [Biodestruction and bioremediation]. Volgograd. [in Russian]

Lopez-Echartea et al., 2020 – Lopez-Echartea, E., Strejcek, M., Mukherjee, S., Uhlik, O., Yrjälä, K. (2020). Bacterial succession in oil-contaminated soil under phytoremediation with poplars. *Chemosphere*. 243: 125242. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125242

Michael-Igolima et al., 2022 – Michael-Igolima, Abbey, U.S.J., Ifelebuegu, A.O. (2022). A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances*. 9: 100319. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100319

Nefed'eva et al., 2020 – Nefed'eva, E.E., Sevriukova, G.A., Zheltobryukhov, V.F., Gracheva, N.V., Abdulabbas, A.Yu.A. (2020). Assortment of herbaceous plants for remediation of soils contaminated with oil products and heavy metals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "AGRITECH-II-2019: Agribusiness, environmental engineering and biotechnologies". 62008. DOI: 10.1088/1755-1315/421/6/062008

Nefed'eva i dr., 2013 – Nefed'eva, E.E., Belitskaya, M.N., Shaikhiev, I.G. (2013). Vozmozhnosti ispol'zovaniya tverdoi fraktsii gorodskikh stochnykh vod v kachestve organomineral'nogo udobreniya v gorodskom i sel'skom khozyaistve [Possibilities of using the solid fraction of municipal wastewater as an organomineral fertilizer in urban and agricultural agriculture]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 16(19): 223-226. [in Russian]

Nefed'eva i dr., 2017 – Nefed'eva, E.E., Sivolobova, N.O., Kravtsov, M.V., Shaikhiev, I.G. (2017). Doochistka stochnykh vod s pomoshch'yu fitoremediatsii [Post-treatment of wastewater using phytoremediation]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 20(10): 145-148. [in Russian]

[Obi-Iyeke, 2022](#) – *Obi-Iyeke, G.* (2022). Screening of maize (*Zea mays* L.) for phytoremediation on crude oil contaminated soil. *FUDMA Journal of Sciences*. 6(3): 254-258. DOI: 10.33003/fjs-2022-0603-876

[Okolelova et al., 2020](#) – *Okolelova, A.A., Zheltobryukhov, V.F., Nefedieva, E.E., Kaplya, V., Merzlyakova, A., Egorova, G.* (2020). Peculiarities of assessment of content of oil products in soils. *E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020*. 01100. DOI: 10.1051/e3sconf/202016101100

[Okolelova et al., 2021](#) – *Okolelova, A.A., Nefed'eva, E.E., Tutarashvili, K.G., Egorova, G.S., Zheltobryukhov, V.F.* (2021). Determination of the state of oil-contaminated soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Workshop on Innovations in Agro and Food Technologies (WIAFT-V-2021)*. 12093. DOI: 10.1088/1755-1315/848/1/012093

[Okolelova i dr., 2020](#) – *Okolelova, A.A., Zheltobryukho, V.F., Nefed'eva, E.E., Egorova, G.S.* (2020). Pochvy urbolandshaftov [Soils of urban landscapes]. Volgograd. [in Russian]

[Okolelova i dr., 2022a](#) – *Okolelova, A.A., Egorova, G.S., Nefed'eva, E.E.* (2022). Degradatsiya, remediatsiya i bioindeksatsiya pochv [Degradation, remediation and bioindexation of soils]. Volgograd. [in Russian]

[Okolelova, Nefed'eva, 2022b](#) – *Okolelova, A.A., Nefed'eva, E.E.* (2022). Remediatsiya pochv [Soil remediation]. Volgograd. [in Russian]

[Rumin et al., 2022](#) – *Rumin, M., Lopatovskaya, O., Stom, D. Zhdanova, G., Kupchinsky, A, Petrova, Yu* (2023). Change in capillary moisture capacity of oil-contaminated soil after washing with Tween-80. *III International Conference on Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture (EESTE2023)*. 3010. DOI: 10.1051/e3sconf/202346303010

[Tutarashvili et al., 2021](#) – *Tutarashvili, K.G., Nefed'eva, E.E., Okolelova, A.A., Dronova, T.N., Zheltobryukhov, V.F.* (2021). The plant resistance to oil contamination in soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Scientific Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies (AGRITECH-V – 2021)*. 022070. DOI: 10.1088/1755-1315/839/2/022070

[Tutarashvili, Nefed'eva, 2021](#) – *Tutarashvili, K.G., Nefed'eva, E.E.* (2021). Effektivnost' ispol'zovaniya zelenykh rastenii dlya remediatsii neftezagryaznennykh pochv. *Sovremennye problemy radiobiologii, radioekologii i agroekologii* [Efficiency of using green plants for remediation of oil-contaminated soils.]. *IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. Pp. 186-189. [in Russian]

[Zheltobryukhov i dr., 2016](#) – *Zheltobryukhov, V.F., Nefed'eva, E.E., Kartushina, Yu.N.* (2019). Rasteniya v usloviyakh zagryazneniya organicheskimi soedineniyami. *Problemy fitoremediatsii* [Plants under conditions of pollution with organic compounds. Problems of phytoremediation]. Volgograd. [in Russian]

[Zheltobryukhov i dr., 2019](#) – *Zheltobryukhov, V.F., Nefed'eva, E.E., Kartushina, Yu.N.* (2019). Rasteniya v usloviyakh zagryazneniya organicheskimi soedineniyami. *Problemy fitoremediatsii* [Plants under conditions of pollution with organic compounds. Problems of phytoremediation]. Volgograd. [in Russian]

## Технология фиторемедиции нефтезагрязненной уплотненной почвы

Алла Ароновна Околелова <sup>a</sup>, Ксения Гочаевна Тутарашвили <sup>a</sup>, Вероника Николаевна Капля <sup>a</sup>, Галина Сергеевна Егорова <sup>b</sup>, Аббас Юсиф Абдул Аббас <sup>c</sup>, Елена Эдуардовна Нефедьева <sup>a, d, \*</sup>, Сергей Леонидович Белопухов <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация

<sup>b</sup> Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

<sup>c</sup> Нефтяное месторождение Аль-Гарраф, Ди-Ка, Ирак

\* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: [nefedieva@rambler.ru](mailto:nefedieva@rambler.ru) (Е.Э. Нефедьева)

<sup>d</sup> Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью исследования была разработка технологии эффективной и безопасной очистки и фиторемедиации сильнокаменистого нефтезагрязненного грунта. Применение технологии механической очистки представлялось рациональным, поскольку не требовало особых затрат на изъятие почвы и ее транспортировку. ПАВы, сурфактанты и другие вещества используются для очистки почвы от нефтяных загрязнений. Было предложено использовать ПАВы, предназначенные для широкого использования в промышленности, в связи с их достаточной изученностью и доступностью. ПАВ *Sokolan* и пеногаситель AF 5503 были наименее токсичными для дальнейшей рекультивации почв. Технология очистки нефтезагрязненного грунта предусматривает их введение в аппарат для более эффективного отделения компонентов нефти от загрязненного грунта. Препараты не будут вносить вклад в токсичность сточных вод и отмытого грунта при дальнейшей рекультивации плодородного слоя почвы. Применение сидератов позволяет улучшить состояние почв и создать условия для развития микрофлоры, участвующей в трансформации нефтепродуктов в почве. Нефть оказывает пагубное влияние на динамику роста семян и стебля подсолнечника. Лучшую всхожесть показали семена горчицы. Кроме того, пшеница, щирца, овес и ячмень выживают на нефтезагрязненной почве и могут быть использованы для фиторемедиации. Горчица и овес лучше приспособились к условиям сильнокаменистого нефтезагрязненного грунта. Рекомендован одновременный высев в солому овса и горчицы белой. Следует провести предпосевную обработку семян препаратом Лигногумат марка Б калийный, норма расхода – 0,5 л/т, расход рабочей жидкости 10-15 л/т. Обработка посевного материала позволит значительно усилить рост и развитие корневой системы растений на первых этапах роста. Перед посевом не следует вносить минеральные удобрения, но можно провести подкормку минеральными удобрениями во время вегетации. В качестве органоминеральных удобрений возможно использовать твердую фракцию городских бытовых сточных вод.

**Ключевые слова:** *Triticum aestivum*, *Avena sativa*, *Hordeum vulgare*, *Sinapis alba*, *Amaranthus albus*, каменистый грунт, промывание грунта в барабанах, ПАВ.