

УДК 631.4.

**Биоаугментация нефтезагрязненных почв***Капля В.Н.<sup>1</sup>, Околелова А.А.<sup>1</sup>, Нефедьева Е.Э.<sup>1</sup>, Егорова Г.С.<sup>2</sup>, Белопухов С.Л.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет**<sup>2</sup>Волгоградский государственный аграрный университет**<sup>3</sup>Российский Государственный Аграрный Университет - МСХА имени К.А. Тимирязева***Аннотация**

*В условиях полевого эксперимента продемонстрирована высокая эффективность метода *in situ* биоаугментации с помощью трех биопрепаратов (Путидойл, Аркойл и Multibas Active) для очистки почв в Волгоградской области через 6 лет после аварийного нефтеразлива. Применение этих биопрепаратов позволило за 4 месяца обработки снизить концентрацию нефтепродуктов в каштановой почве (исходно от 50100 до 50550 мг/кг) на 72,2–98,6 %. Наилучшие результаты были получены на участке, обработанном биопрепаратом Путидойл, где концентрация нефтепродуктов к концу сезона снизилась до от 5500 до 699 мг/кг. Детоксикация нефтезагрязненных почв с помощью биопрепаратов позволит обеспечить экологически безопасное состояние почв.*

**Ключевые слова:** НЕФТЕПРОДУКТЫ, КАШТАНОВАЯ ПОЧВА, ПУТИДОЙЛ, АРКОЙЛ, MULTIBAS ACTIVE, БИТОАУГМЕНТАЦИЯ, ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА

---

**Введение**

Восстановление почвы, загрязненной нефтью и нефтепродуктами – сложный и длительный процесс. Знание общих принципов и методов восстановления почв и их применение к конкретным природным условиям является важной задачей, имеющей большое значение для сохранения здорового состояния окружающей среды. Разнообразные методы удаления и деструкции нефтяных загрязнений в почве позволяют решить многие вопросы по минимизации антропогенного воздействия на окружающую

среду. Разработка и усовершенствование методов очистки почв – актуальные задачи современности. Одним из наиболее эффективных методов очистки почвы от нефтепродуктов является биоремедиация, основанная на создании оптимальных условий для активации аборигенных микроорганизмов-деструкторов или инокулированных в виде биопрепаратов бактерий, микромицетов или их смесей [1-3].

Значение концентраций нефтепродуктов в почве на биологически безопасном уровне в настоящее время не установлено. Невозможно обосновать их предельно допустимую концентрацию в почве, поскольку в их состав входят соединения, являющиеся необходимым компонентом любой почвы. Естественные объективные причины, такие как полифункциональность и неоднородность почв, разнообразие химических форм поллютантов, способность почв к самовосстановлению и самоочищению, значительно усложняют объективную оценку содержания нефти и нефтепродуктов в почвах [1, 4].

Процесс биодegradации с помощью биодеструкторов позволяет преобразовать или минерализовать органические поллютанты посредством метаболических или ферментативных процессов в менее вредные – включаются в естественные биогеохимические циклы [5-7]. Известно, что устойчивость почвы к антропогенному загрязнению зависит от ее физико-химических и агробиологических свойств [8–15].

Технология биоремедиации была разработана в последние десятилетия и все чаще ее используют для смягчения последствий экологических аварий и систематических загрязнений. Она основана в большей мере на применении бактерий (около двух третей статей и патентов). Интродукция углеводородокисляющей микрофлоры в почву – один из перспективных методов устранения загрязнения почв нефтью. Недавней тенденцией в биоремедиации почв нефтью и нефтепродуктами является сочетание биоремедиаторов (грибов и бактерий) в одном и том же процессе детоксикации [8, 16–18]. В научной литературе описано более 20 родов бактерий и более 10 грибов, на примере которых показаны возможности биодegradации нефтяных углеводородов [8, 19].

Микробиологическая дegradация один из основных и наиболее решающих природных механизмов удаления нефтяных углеводородных загрязнителей из окружающей среды, а бактерии являются наиболее активными микроорганизмами с точки зрения разложения нефти, действуя в качестве основных деструкторов разлитой нефти в окружающей среде [20, 21]. Внесение биопрепарата способствует интенсивной

деструкции нефти. При этом в почве образуется конкурентноспособная ассоциация микроорганизмов. В настоящее время чаще используют биопрепараты, состоящие из нескольких штаммов, поскольку интродукция монокультуры углеводородокисляющих микроорганизмов в загрязненной почве не может решить проблемы их очистки. Нефть - сложный субстрат и отдельный штамм не способен к ее полной утилизации, так как не обладает всем спектром необходимых ферментов [8, 22].

Charneau et al [13] изучали влияние добавок питательных веществ на биодegradацию сырой нефти и на связанные с ней популяции микроорганизмов в сельскохозяйственной почве в микрокосмосе в ходе 150-дневного эксперимента. Начальная концентрация углеводов в искусственно загрязненной почве составляла 7300 мг/кг почвы. Добавление ограниченного количества минеральных питательных веществ (азота, фосфора и калия) значительно увеличивало разложение углеводов; через 150 дней их остаточная концентрация в почве составила 2278 мг/кг почвы. Высокие концентрации питательных веществ снижали степень биодegradации, средние концентрации элементов питания незначительно меняли ситуацию. Конечные степени биодegradации составили соответственно 47 % (высокое содержание питательных веществ), 49 % (среднее содержание питательных веществ) и 62 % (низкое содержание питательных веществ). Биодegradация насыщенных углеводов последовала за общим снижением общего содержания углеводов с максимальной степенью биодegradации.

При высоком поступлении питательных веществ было зафиксировано стойкое ингибирование ассимиляции углеводов. Биодegradация насыщенных, ароматических и полярных соединений была соответственно, в первом случае, постоянной, временной при средней концентрации элементов питания и не снижалась из-за чрезмерного внесения удобрений в почву [8, 22, 23].

Angelos Dados et al [21] исследовали две стратегии биоремедиации в почве, сильно загрязненной углеводородами. В рамках одной из них использовали различные удобрения и компостированные винодельческие продукты для стимулирования местного микробного сообщества, способного снижать содержание углеводородов нефти в почве. При втором подходе для снижения токсикации почвы применяли бактерии, разлагающие углеводороды. Среди множества фракций n-алканов были отмечены различные схемы диссипации: молекулы с короткой цепью (до 14 атомов углерода) быстро разлагались в течение первых 21 дня, в то время как молекулы с длинной цепью были устойчивыми.

Штаммы рода *Pseudomonas*, внесенные в почву вместе с компостом, полученным из отходов винодельческой промышленности, можно эффективно использовать для ускоренной биоремедиации почвы, сильно загрязненной углеводородами.

Целью данной работы является выявление эффективности применения биопрепаратов для биоаугментации нефтезагрязненных каштановых почв Волгоградской области в данных почвенно-климатических условиях.

### Материалы и методы

Объектом исследования является загрязненный участок, площадью 50,3 м<sup>2</sup>, расположенный между с. Сосновка и с. Бурлук Котовского района Волгоградской области, примерно в 5,5 км по направлению на юго-восток от ориентира здание почты с. Сосновка Котовского района Волгоградской области (рис. 1).

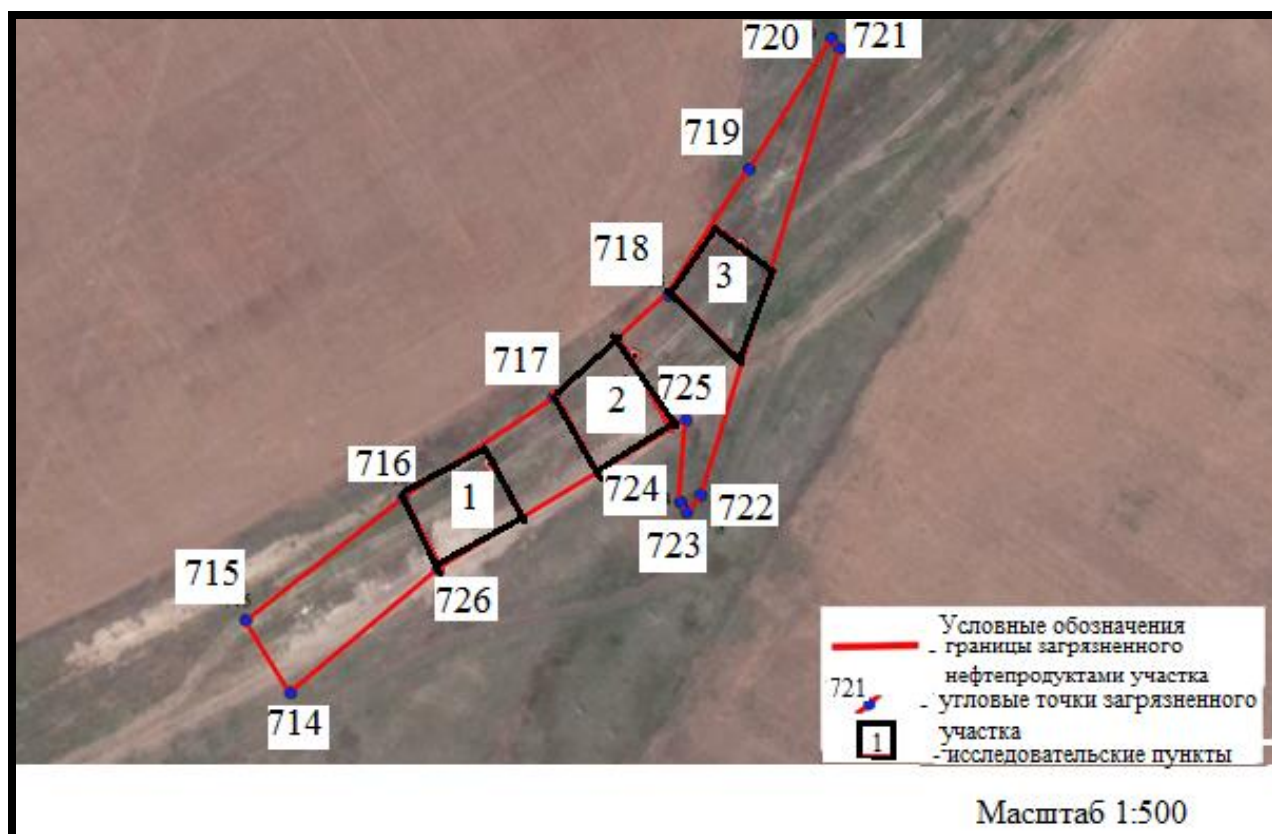


Рис. 1. Схема расположения исследуемого загрязненного нефтепродуктами участка в Волгоградской области, его границ и мест отбора

Доступ к участку обеспечивает грунтовая дорога. Согласно акту осмотра от 08.06.2015 г. в результате прорыва нефтепровода произошел разлив нефти. Территорию ранее использовали под пашню, но после аварийного разлива выращивание сельскохозяйственных культур было запрещено. В момент исследования участка в декабре 2021 г. опознавательные знаки о наличии нефтепровода отсутствовали. Поверхностный слой участка был нарушен, в некоторых местах отсутствовал травяной покров. При визуальном исследовании были зафиксированы пятна затвердевших нефтепродуктов, присутствовал характерный запах. Пробы почв отбирали по ГОСТу Р 58596–2019 [24], подготовку почв к анализам – по ГОСТу 17.4.4.02-2017 [25].

Почва на участке каштановая суглинистая карбонатная среднemosная. Величина рН 8,2 (потенциометрически по Е.В. Аринушкиной). Содержание подвижного фосфора (по Б.П. Мачигину) низкое – 1,24 г  $P_2O_5$ /100 г почвы; обменного калия (по А.Л. Масловой) 35,48  $K_2O$ /100 г почвы, очень высокое; гидролизуемого азота (по В.И. Филину) – низкое, 40,5 мг /100 г почвы [26, 27]. Навеску воздушно-сухой почвы для определения подвижного фосфора составляла 5 г воздушно-сухой почвы, обменного калия и гидролизуемого азота – по 20 г воздушно-сухой почвы. Повторность анализов трехкратная.

Существует мнение, что из-за высокого загрязнения почвы, требовательности микроорганизмов к условиям среды, сложности в приобретении, биопрепараты показывают недостаточно высокую эффективность в реальных условиях, поэтому их широкое использование не оправдано с экономической точки зрения [28]. Другие специалисты полагают, что применение биопрепаратов экономически целесообразно, не требует сложного оборудования, специальной техники и сложных мероприятий [8, 22].

Для проведения исследования были выбраны три площадки в центре участка, где были отобраны методом конверта пробы почвы на анализ с глубины 0–30 см. Почву перед внесением препаратов рыхлили. Для наглядности, каждую из них огораживали 4 кольями, расположенными в виде квадрата размером 1,5 x 1,5 м<sup>2</sup>, по периметру между ними была протянута сигнальная лента. Координаты точек представлены в таблице 1.

Таблица 1. Координаты модельных экспериментально-исследовательских пунктов на загрязненном участке

№ площадки	Название биопрепарата	Географические координаты	
		С.Ш.	В.Д.
1	Путидойл	50°30'54.91"	44°38'23.82"
2	Аркойл	50°30'56.24"	44°38'26.24"
3	Multibac Active	50°30'57.33"	44°38'28.38"

*Примечание:* Система координат – WGS-84.

После проведения первичного анализа на каждой площадке были внесены биопрепараты на глубину до 0,3 м в мае 2022 г. На участке № 1 – «Путидойл», № 2 – «Аркойл», № 3 – «Multibac Active». Через 4 месяца на каждом участке был произведен повторный отбор почв и определено содержание нефтепродуктов. Препараты «Путидойл» и «Аркойл» применяли в виде сухого порошка, «Multibac Active» – в жидком виде.

Для оценки содержания нефтепродуктов в почве проводили их экстракцию хлороформом из воздушно-сухого образца почвы. Затем в экстракте разделяли полярные и неполярные соединения при помощи колоночной хроматографии после замены растворителя на н-гексан. Количественное определение выделенных нефтепродуктов осуществляли гравиметрическим методом [29]. Прибор: весы электронные НТР-220СЕ, погрешность 15 %.

Нами были выбраны участки с сопоставимым содержанием нефтепродуктов. Концентрация нефтепродуктов в почве до применения биопрепаратов в почвах трех опытных участков незначительно превышала 50000 мг/кг. Соответственно на 1 участке 50550, на втором 50350, на третьем – 50100 мг/кг.

На площадке № 1 после внесения препарата «Путидойл» концентрация нефтепродуктов снизилась с 50550 до 699 мг/кг, в точке № 2, («Аркойл») – с 50350 до 7013, в точке № 3, (Multibac Active») – с 50100 до 13907. Эффективность очистки почвы от нефтепродуктов соответственно составила 98,60; 85,97 и 72,19 %.

### Результаты и обсуждение

При выборе биопрепаратов главными факторами стали: доступность, распространенность и невысокая стоимость, простота в применении. В рамках проведения исследования, были закуплены и опробованы биопрепараты, предназначенные для детоксикации почв от нефти и нефтепродуктов с помощью бактерий, грибов и их

сочетаний: «Путидойл», «Аркойл», «MultibacActive». Существует целый ряд биопрепаратов, применяемых для деструкции компонентов нефти путем биодеструкции. Химический и композиционный состав отдельных компонентов нефти определяет метаболизм утилизации их микроорганизмами.

Все углеводороды нефти частично или полностью окисляются микроорганизмами. Микроорганизмы могут фракционировать углеводороды, ассимилируя тяжелые фракции для синтеза собственной биомассы и удаляя легкие в виде углекислого газа. Способность микроорганизмов к активной утилизации углеводородов используют для ремедиации территорий, загрязненных нефтью [8, 17, 20].

Углеводородоокисляющие микроорганизмы могут свободно существовать в природе, а также использоваться для ремедиации нефтезагрязненных почв. Они составляют основу биопрепаратов. В настоящее время известно около 100 штаммов бактерий, дрожжеподобных и мицелиарных грибов, которые окисляют углеводороды и используют продукты окисления для своей жизнедеятельности. В состав биопрепаратов для ремедиации входят микроорганизмы, которые способны к наиболее эффективному окислению углеводородов нефти по сравнению с другими бактериями [8, 22].

#### Путидойл

Препарат разработан для детоксикации поверхностей водоемов и почв от нефти и нефтепродуктов. Он способствует ускорению деструкции нефти. Основным деструктором в его составе является углеводородоокисляющий штамм *Pseudomonas putida*. Путидойл был первым, применяемым на практике биопрепаратом-нефтедеструктором. Бактериальная масса подвергалась распылительной сушке. Ее используют в виде суспензии бактериальных клеток (не более 0,2 % к объему раствора). В состав препарата входят растворы минеральных солей, в составе которых биодоступные формы азота (аммофоса и диаммофоса).

Интенсивность разложения нефти и нефтепродуктов напрямую зависит от обеспеченности почв биогенными элементами. По данным N. Song с соавторами (1990) внесение удобрений и микробных культур повышает скорость удаления нефти из почвы в 2-5 раз [22].

Совместное применение биопрепаратов и минеральных солей показывает существенную эффективность при снижении концентрации нефти в почве [8, 17, 22]. Для активирования сухого препарата водную суспензию выдерживали, перемешивая и аэрируя в течение от 10 часов при температуре от 26 до 30 °С. Важнейшие характеристики биопрепарата «Путидойл» приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристика препарата «Путидойл»

Рабочая среда	Необходимое количество для детокикации	Продолжительность очистки в оптимальных условиях	Защита права интеллектуальной собственности
Температура °С: от +10 до +35; Содержание нефтепродуктов в почве ≤ 10 % при глубине проникновения ≤ 15 см	От 3 до 15 кг/га почвы, от 3 до 5 г/м <sup>3</sup> грунта	1–2 месяца или 2–3 недели на специальных площадках	А.с. 1428809 опубл. 07.10.1988; инструкция по применению

В основе производства изучаемого препарата - технология распылительной сушки живой культуры микроорганизмов при температуре около +60 °С. Такой метод не позволяет получить препарат с высоким титром КОЕ из-за инактивации значительной части бактериальных клеток под влиянием высокой температуры (+60 °С).

Для восстановления численности и жизнедеятельности бактерий в биопрепарате перед его использованием применяют достаточно длительное перемешивание препарата в большом количестве теплой воды (температура 18÷28 °С). В процессе подготовки осуществляют аэрирование для обеспечения потребностей бактерий в кислороде. Рост бактерий в ходе подготовки продолжается в течение 16÷24 ч. Это усложняет, замедляет, зачастую делает неприемлемым применение данного препарата в реальных условиях.

#### Аркойл

В настоящее время часто применяют биопрепараты, в составе которых несколько штаммов, так как известно, что интродукция монокультуры углеводородокисляющих микроорганизмов в загрязненной почве не может эффективно решить проблему ее очистки [8, 22]. Биопрепарат-нефтедеструктор «Аркойл» представляет собой ассоциацию нефтеокисляющих штаммов бактерий:



- Bacillus atrophaeus* ВКМ В-3137D;
- *Pseudomonas putida* ВКМ В-3136D;
- Rhodococcus sp.* ВКМ Ас-2764D;
- Arthrobacter sp.* ВКМ Ас-2765D;
- Bacillus megaterium* ВКМ В-3138D.

Микроорганизмы выращены при отдельном культивировании. Они входят в состав препарата в равных соотношениях. Общее содержание микроорганизмов в препарате – не менее  $15 \div 20 \times 10^9$  кл/мл. Препарат выпускают в жидкой форме, расфасованным в полиэтиленовые емкости. Существует также сухая форма препарата, которую получают путем концентрирования культуральной среды с микроорганизмами на микрофильтрационной установке. Концентрирование позволяет получить суспензию с общим содержанием микроорганизмов  $50 \div 65 \times 10^9$  кл/мл.

Микроорганизмы, входящие в состав биопрепарата «Аркойл», способны внедряться непосредственно в толщу нефтяной пленки, при этом разлагая все углеводороды до экологически нейтральных продуктов, что существенно снижает время нейтрализации загрязнения микроорганизмами, и препятствует их вымыванию из почвы паводковыми водами и ливневыми дождями. По окончании этапа биологической обработки нефтяного загрязнения в почве накапливаются продукты жизнедеятельности микроорганизмов, представляющие собой легко разлагаемые органические вещества биологического происхождения, преимущественно – бактериальный белок, а также нетоксичные продукты разложения нефти. Такие остатки не являются специфическими загрязнителями, они не требуют последующей специальной утилизации.

Биопрепарат выпускают в трех видах: жидкой суспензии, концентрированной жидкой суспензии и сухого порошка после сушки. Срок хранения препарата в жидкой форме при температуре  $5 \div 20$  °С не более 6 месяцев, а в сухой форме при температуре от  $-20$  °С до  $+25$  °С – 1,5 года.

В сухом биопрепарате биомасса микроорганизмов иммобилизована на природном сорбенте. При этом лиофилизированный порошок получают методом контактно-сорбционного обезвоживания. Для этого применяют импульсное распыление концентрированной суспензии в смесителе на поверхность сухого природного минерала глауконит (влажность менее 2 %).

Глауконит предварительно опудривают аэросилом АМ-300 в дозе 1,5–2 %, что обеспечивает обезвоживание бактериальной биомассы до оптимальной величины активности воды ( $A_w = 0,2 \div 0,3$ ).

Для приготовления жидкой формы препарата все микроорганизмы смешивают в отдельной емкости в равных соотношениях. Общее содержание клеток контролируют методом высева на плотной питательной среде (ГРМ-агар). В результате количество живых клеток составляет  $15 \pm 3 \times 10^9$  кл/мл.

### Multibac Active

Препарат представляет собой высоко концентрированную жидкую смесь, включающую штаммы бактерий. В наборе штаммов присутствуют микроорганизмы с разнообразными метаболическими потребностями: аэробы и анаэробы, фотосинтетики и хемосинтетики. Такой набор микроорганизмов с разнообразным набором ферментов позволяет эффективно использовать широкий спектр органических соединений. Препарат не является патогенным для человека и животных, безвреден для окружающей среды.

Бактерии, содержащиеся в этом биопрепарате, ускоряют биологическое окисление органических соединений, увеличивают скорость удаления трудно разлагаемых и неразлагаемых аборигенными микроорганизмами веществ, понижают концентрацию компонентов, ингибирующих процесс разложения, тем самым ускоряют биodeградацию нефтепродуктов.

При уровне загрязнения почв нефтепродуктами более 300 мг/кг количество биопрепарата на 1 га составляет 500 л, рекомендуемое число обработок – 2 раза в год. Перед его распылением рекомендовано разрыхление загрязненной почвы. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительная таблица эффективности биопрепаратов

№ участка	Название биопрепарата	Концентрация нефтепродуктов после применения биопрепаратов, мг/кг	Эффективность очистки почвы, %
1	Путидойл	699±189	98,60±0,40
2	Аркойл	7013±1894	85,97±3,75
3	Multibac Active	13907±3755	72,19±7,50

Абиотические факторы деструкции нефти зависят от климатических особенностей региона. В сухих и жарких регионах темпы процесса физико-химического выветривания будут выше, чем во влажных и холодных [8, 30].

В условиях дефицита влаги и высоких температур, что относят к провинциальным климатическими условиям Волгоградской области, Путидойл, основным деструктором в котором является углеводородокисляющий штамм *Pseudomonas putida*, показал наибольшую эффективность. Можно полагать, что этому способствовало и содержание в его составе биодоступных форм азота в виде аммофоса и диаммофоса.

Меньший результат в варианте с применением биодеструктора «Аркойл» предположительно может быть вызван именно большим набором нефтеокисляющих почвенных микроорганизмов. В условиях высокой инсоляции их действие может быть ослаблено вследствие антагонизма штаммов. В наборе штаммов Multibac Active микроорганизмы с разнообразными метаболическими потребностями: аэробы и анаэробы, фотосинтетики и хемосинтетики. Можно предположить, что данное разнообразие в климатических условиях Волгоградской области с учетом свойств каштановой почвы, ее малогумусности, понижает его эффективность.

#### **Выводы:**

1. Применение метода *in-situ* биоаугментации с помощью трех биопрепаратов на основе штаммов-нефедеструкторов (Путидойл, Аркойл или Multibac Active) через 6 лет после нефтяного разлива в Волгоградской области позволило снизить концентрацию нефтепродуктов в каштановой почве (исходное содержание нефтепродуктов в пределах 50100–50550 мг/кг) на 72,2-98,6 %, что подтверждает высокую очищающую способность биопрепаратов.

2. В почвенно-климатических условиях Волгоградской области, наилучший результат показало применение препарата «Путидойл» на основе бактериального штамма *Pseudomonas putida*, в состав которого входят диаммофос и аммофос, содержащие доступные формы азота. Концентрация нефтепродуктов в почве за этот период снизилась с 50550 до 699 мг/кг.

## Список использованных источников:

1. Okolelova A., Zheltobryukhov V., Nefedieva E., Egorova G., Kaplya V., Merzlyakova A. Peculiarities of assessment of content of oil products in soils // E3S Web of Conferences. Vol. 161: International Conference on Efficient Production and Processing (ICEPP-2020) (Prague, Czech Republic, February 27-28, 2020) / ed. by J. Smyatskaya. – [Publisher: EDP Sciences], 2020. – 5 p. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101100>.
2. Абдусалимова Р.Р., Баламирзоева З.М. Деградация почв и ее последствия. // Вестник Социально-педагогического университета. - 2022. - № 2. (420). - С. 31–36.
3. Кирий О.А. Использование углеводородокисляющих бактерий при биоремедиации нефтезагрязненных почв и вод: монография. - Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. - 2013. - 140 с.
4. Kalinichenko V.P., Glinuschkin A.P., Svidnisky A.V., Minkina T.M., Budyanko N.I., Okolelova A.A., Makarenkov D.A., Biogeosystemic methodology for soil yealth and Productiovit A review // Биосфера. Научный и прикладной журнал. - 2022. - Т. 14. - № 3. - С. 175–192.
5. Курицын А.В., Курицына Т.В., Катаева И.В. Биоремедиация нефтезагрязненных грунтов на технологических площадках // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. - Т. 13. 1–5. - С. 1271–1273.64.
6. German N.V, Sevriukova G.A., Nefed'eva E.E., Polovinkina Yu.S., Gavrillov D.A. 2019 Cellulose-decomposing microorganisms of light chestnut soils of the Volgograd region IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 315 072031
7. Баландина А.В., Кузнецов Д.Б., Бурдова Л.В. Самовосстановление нефтезагрязненных почв // Успехи современного естествознания. - 2014. - № 4. - С. 85–88.
8. Шкидченко А.Н., Ахметов Л.И. Биотехнология ликвидации антропогенных загрязнений. - Учебное пособие. Science. - М.: 2022. - 114 с.
9. Nefed'eva E.E., Sevriukova G.A., Zheltobryukhov V.F., 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. Vol. 421: 2nd International Scientific Conference «AGRITECH-II-2019: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» (Krasnoyarsk, Russia, 13-14 November, 2019). - [IOP Publishing], 2020. 7 p. DOI: [10.1088/1755-1315/421/6/062008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/6/062008).
10. Капля В.Н., Околелова А.А., Егорова Г.С. Детоксикация нефтезагрязненных каштановых почв. Материалы III международной научной конференции и II международной научной школы для молодых ученых «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки». Ростов-на-Дону-Таганрог. - ЮФУ. - 2023. - С. 390–394.
11. Ветрова А.А. Биодеградация углеводов нефти плазмид-содержащими микроорганизмами-деструкторами. – автореф. ... дис. канд. биол. наук. - М.: МГУ. - 2010.

- 26 с.

12. Rahman K.S.M., Rahman T.J., Petsas I., Marchant R., Banat I.M. Enhanced bioremediation of n-alkane in petroleum sludge using bacterial consortium amended with rhamnolipid and micronutrients // *Bioresour Technol.* - 2003. - № 90. - P. 159-168.

13. Chau^neau C.H., Rougeux G., Ye'pre'mian C., Oudot J. Effects of nutrient concentration on the biodegradation of crude oil and associated microbial population in the soil // *Soil Biology Biochemistry.* - 2005. - № 37. - P. 1490-1497.

14. Рогозина Е.А., Тимергазина Н.Ф., Моргунов П.А. Очистка нефтезагрязненных почв бактериями рода *Pseudomonas* – основой биопрепаратов НАВФТОКС-12Р и НАФТОКС48-У. *Нефтегазовая геология. Теория и практика.* - 2014. - Т.9. - № 23. - С. 1–14.

15. Водянова М.А., Хабарова Е.И., Донерьян Л.Г. Анализ существующих микробиологических препаратов, используемых для биодegradации нефти в почве // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* - 2010. - № 7. - С. 253–258.

16. Rosa Margesin, Marion Hammerte, Dagmar Tscherko. Microbial Activity and Community Composition during Bioremediation of Diesel-Oil Contaminated Soil: Effect of Hydrocarbon Concentration Fertilizers and Incubation // *Microbial Ecology.* - 2007. - V. 53. - P. 259-269.

17. Margesin R., Schinner F. *Manual of Soil Analysis Monitoring and Assessing Soil Bioremediation.* Heidelberg. Springer. - 2005. - 366 p.

18. Salanitro J.P. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in soil // *Advances Agronomy.* - 2001. - V. 72. - P. 53-105.

19. Semple K.T., Morriss A.W.J., Paton G.I. Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis // *European journal of soil science.* - 2003. - T. 54. - № 4. - P. 809-818.

20. Nefed'eva E.E., Sevriukova G.A., Zheltobryukhov V.F., 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.* Vol. 421: 2nd International Scientific Conference «AGRITECH-II-2019: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» (Krasnoyarsk, Russia, 13-14 November, 2019). - [IOP Publishing], 2020. - 7 p. DOI: [10.1088/1755-1315/421/6/062008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/6/062008).

21. Angelos Dados, Michalis Omirou, Kyroula Demetriou, Chara Papastephanou, Ioannis M. Ioannides Rapid remediation of soil heavily contaminated with hydrocarbons: a comparison of different approaches // *Ann Microbiol.* - 2015. - № 65. - P. 241-251. DOI: [10.1007/s13213-014-0856-5](https://doi.org/10.1007/s13213-014-0856-5).

22. Song H.G., Wang X., Barthag R. Bioremediation potential of terrestrial fuel spills // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1990. - V 56. - № 3. – P. 652-656.

23. Garbisu G.C., Alkorta I., Garbisu G.C. and Alkorta I. 2001 Phytoextraction: A cost-

effective plant-based technology for the removal of metals from the environment Bioresources Technol. - 77 229-36.

24. ГОСТ Р 58596–2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Почвы. Отбор проб. Введен в действие приказом Росстандарта от 10.10.2019. № 954-ст. - 5 с.

25. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Введен в действие приказом Росстандарта от 17.04.2018. Приказ № 202-ст. - 5 с.

26. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. - М.: МГУ, 1961. – 492 с.

27. Орлов Д.С. Физико-химические методы исследования почв: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению. - «Почвоведение». - М.: МГУ, 2020. - 854 с.

28. Cunningham S. and Berti W. 1993. Remediation of contaminated soils with green plants: an overview In Vitro Cell. Dev. Biol. - 29. 207–212.

29. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробе почв гравиметрическим методом. ПНДФ 16.1.412–04. - М.: 2004. - 13 с.

30. Шентерова Е.М. Биология почв. - Учебное пособие. Владимир. - Владимирский гос. университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. - 2020. – 217 с.

---

**Цитирование:**

Капля В.Н., Околелова А.А., Нефедьева Е.Э., Егорова Г.С., Белопухов С.Л. Биоаугментация нефтезагрязненных почв [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 6. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/6/st\\_630.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/6/st_630.pdf) DOI: <https://doi.org/10.51419/202136630>.