

УДК 631.4:579.6  
DOI 10.17513/use.38215

## ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ПОЧВЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОСОРБЕНТОВ

Соболева С.В., Есякова О.А., Воронин В.М.

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: swet.soboleva2011@yandex.ru*

Материалы содержат исследование по использованию биосорбентов «С-ВЕРАД» и «Biteoil» для очистки почвенного покрова от нефтепродуктов. В качестве анализируемых выступили образцы загрязненных нефтепродуктами почв, отобранные в районе нефтепровода «Куюмба – Тайшет». Биопрепараты вносились в концентрации 200 г на 1 м<sup>2</sup> при глубине загрязнения 20 см. Установлено, что наиболее эффективным деструктором нефти является биосорбент «Biteoil». В результате эксперимента выявлено, что биопрепарат «Biteoil» на основе консорциума микроорганизмов-нефтедеструкторов, нанесенный на торфоминеральный субстрат, позволяет устранить распространение загрязняющих веществ на смежных экосистемах, добиться полного удаления нефтяных пятен на грунте. Преимуществом биопрепарата «Biteoil» является высокая степень очистки почв от нефтепродуктов (до 90%) в условиях Восточной Сибири за короткий промежуток времени (до 60 суток). В полевых условиях использование биосорбента «Biteoil» и достижение значительного снижения концентрации нефтепродуктов в почве с 2 000 до 200 мг/кг в течение двух месяцев отражает его высокую эффективность. Это дает основание полагать, что использование данного биосорбента может быть полезным и представлять интерес для дальнейших исследований и практического внедрения в области очистки загрязненной почвы.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, биосорбент, почва, загрязнение, биологические методы очистки

## A PROMISING METHOD OF SOIL PURIFICATION FROM PETROLEUM PRODUCTS USING BIOSORBENTS

Soboleva S.V., Esyakova O.A., Voronin V.M.

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk,  
e-mail: swet.soboleva2011@yandex.ru*

The materials contain a study on the use of biosorbents “S-VERAD” and “Biteoil” for cleaning soil from petroleum products. Samples of soil contaminated with petroleum products taken in the area of the Kuyumba-Taishet oil pipeline were analyzed. Biologics were applied at a concentration of 200 g per 1 square meter with a contamination depth of 20 cm. It has been established that the most effective oil destructor is the biosorbent “Biteoil”. As a result of the experiment, it was revealed that the biological product “Biteoil” based on a consortium of microorganisms-oil destructors, applied to a peat mineral substrate, allows to prevent the spread of pollutants to adjacent landscapes, to eliminate oil spills on the ground. The advantage of the Biteoil biological product is a high degree of soil purification from petroleum products (up to 90%) in Eastern Siberia in a short period of time (up to 60 days). In the field, the use of Biteoil biosorbent and the achievement of a significant reduction in the concentration of petroleum products in the soil from 2,000 to 200 mg/kg within two months reflects its high efficiency. This gives reason to believe that the use of this biosorbent may be useful and of interest for further research and practical implementation in the field of cleaning contaminated soil.

**Keywords:** petroleum products, biosorbent, soil, pollution, biological purification methods

На сегодняшний день остается актуальной проблема загрязнения почвенного покрова нефтесодержащими веществами, а также продуктами нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий. Нефтегазовая отрасль остается одной из областей деятельности с повышенной аварийностью.

Существует несколько способов очистки почвенного покрова от нефтепродуктов (НП): механический, физико-химический и биологический. Первый включает в себя удаление веществ нефтяных загрязнений с помощью растворителя или обработкой почвы электронагревом (витрификация). Физический метод позволяет удалять ионы

загрязнителя с помощью электрического тока (электромелиорация). Химическим воздействием на загрязнитель возможно подействовать посредством окислителя, а биологическим – благодаря использованию достижений биотехнологии [1].

Для объективной оценки состояния почв необходим систематический мониторинг на территории потенциальной опасности их загрязнения, причем в перечень пробных площадей должны быть включены природные аналоги или ландшафты с минимальной степенью изменчивости (фоновые территории) [2]. Сложностью получения репрезентативных данных мониторинга яв-

ляется то, что точное определение содержания химических элементов в почвах может быть сложным и трудоемким процессом. Это связано с необходимостью полного разложения алюмосиликатов, которые удерживают значительную часть этих элементов, особенно в незагрязненных почвах [3].

В случае загрязнения почв в результате разлива нефтепродуктов остро встает вопрос выбора метода ликвидации разлива и последующей рекультивации нарушенных ландшафтов. И одним из перспективных методов является сорбционный. Одной из ключевых характеристик сорбентов, которые привлекают внимание при очистке почв от НП, являются их природа происхождения и отсутствие токсичности. В контексте последующей рекультивации территории важно, чтобы выбранный сорбент не только очищал, но и улучшал структуру почвы. Кроме того, желательно, чтобы сорбент обладал свойствами биоразложения, что способствует естественному процессу разложения загрязнений. Также источником минерального питания для углеводород-разлагающих бактерий может служить выбранный сорбент. Все эти свойства делают сорбенты эффективными инструментами для рекультивации загрязненных территорий [4, 5].

Экологичности процесса ликвидации загрязнения нефтепродуктами возможно достичь посредством биоремедиации. Биоремедиация – это процесс, при котором целенаправленно усиливается активность специфической микрофлоры в почве, которая способна разлагать НП. Для этого можно добавить определенные микробные культуры в почву или использовать биосорбенты – сорбенты, на которых закреплены микроорганизмы, способные разрушать НП. Еще один подход к биоремедиации – это фиторекультивация, при которой используются растения для создания благоприятных условий для микроорганизмов, осуществляющих утилизацию НП и нефти. Оба подхода имеют свои преимущества и могут быть эффективными методами биоремедиации.

Продолжаются исследования, направленные на изучение возможности генетической модификации микроорганизмов для улучшения их способности разлагать нефтяные загрязнения. Это может включать изменение генов, ответственных за процессы разложения углеводов, чтобы усилить их активность или изменить их специфичность по отношению к определенным

типам нефтяных загрязнений. В целом исследования в этой области имеют большой потенциал для разработки более эффективных и экологически безопасных методов очистки нефтяных загрязнений. Однако для применения этих методов на практике необходимо учесть все возможные негативные последствия для окружающей среды и общества и провести достаточное количество исследований и испытаний, чтобы гарантировать их безопасность и эффективность.

Цель данного исследования заключается в изучении современных методов очистки почвенного покрова от НП с использованием биосорбентов «С-ВЕРАД» и «Biteoil».

### Материалы и методы исследования

Для проведения исследования отбор проб почвы осуществлялся на площади аварийного разлива НП в районе нефтепровода «Курумба – Тайшет», который проходит по территориям Эвенкийского, Богучанского и Нижнеингашского районов Красноярского края и Тайшетского района Иркутской области. Нефтепровод относится к объекту повышенной опасности, на котором возможны различные ситуации, связанные с попаданием НП в почву в результате аварий и техногенных катастроф [6].

В работе были использованы два сорбента для очистки почвенного покрова от НП «С-ВЕРАД» и «Biteoil». Характеристика сорбентов представлена в табл. 1.

По сравнению с сорбентами органического (мох, древесные опилки) и полимерного (синтепон, пенопласт) происхождения, угольный сорбент «С-ВЕРАД» имеет ряд преимуществ: химически стоек, сохраняя при этом высокую поглотительную способность; не горюч (температура плавления 1200 °С); пожаровзрывобезопасен. Однако необходимость специального оборудования для его использования и продолжительное время очистки ограничивают возможности его применения. Поэтому в работе использовали «С-ВЕРАД» для сравнения с препаратом «Biteoil» [7], состоящего из группы микроорганизмов, способных разлагать нефть, нанесенную на торфяной субстрат. Биосорбент «Biteoil» не требует удаления после применения, может применяться на обводненных и тяжелых почвах [8].

Микроорганизмы, содержащиеся в биопрепарате, обладают повышенной способностью к выживанию при экстремально низких температурах и эффективно разлагают нефть при низких температурах.

Таблица 1

## Характеристика сорбентов «С-БЕРАД» и «Biteoil»

Наименование показателей	«С-БЕРАД»	«Biteoil»
Состав	– минерал природный, модифицированный углеродной пленкой; – углерод; – биостимулятор роста аборигенной микрофлоры	– верховой торф и ассоциация штаммов, в соотношении компонентов, мас. %: гидрофобный верховой торф – 90%; биоэмульсия – 10%
Внешний вид	Серебристо-желтые гранулы неправильной формы	Торф с фрагментами мха, от серого до темно-коричневого цвета
Фракционный состав, мм	0,5–2	0,5–3,0
Насыпная плотность, не менее кг/м <sup>3</sup>	90–100	150–450
Нефтеемкость, не менее кг/кг	9	12
Скорость биодegradации, сут. не менее	120	60
Массовая доля влаги, не более %	6	30
Горючесть	Группа негорючие	Группа негорючие
Химическое взаимодействие	Химически инертен при контакте с кислотами, щелочами, нефтепродуктами	Химически инертен при контакте с кислотами, щелочами, нефтепродуктами
Поглотительная способность по нефти с вязкостью 50 °	Не менее 100 %	Не менее 350 %
Время образования конгломерата, с	60	30
Биодегенерационная активность через 7 суток, не менее	5–15 %	31–44 %
Десорбция	Отсутствует	Отсутствует

Одним из ключевых аспектов при приготовлении биосорбента является выбор метода нанесения биоэмульсии, содержащей ассоциацию штаммов *Rhodococcus erythropolis* AC-1260, AC-1660 на гидрофобный верховой торф в качестве сорбент-носителя. При этом необходимо сохранить свойства, определяющие эффективность готового продукта. В состав используемой среды включены компоненты, присутствующие в биоэмульсии, а также микроэлементы (железо и кальций), которые обычно содержатся в водной и почвенных средах. Нанесение биоэмульсии на сорбент осуществляется методом аэрозольным. Предлагаемый рецепт биоэмульсии обеспечивает защиту нефтедеструкторов-микроорганизмов при их диспергировании и нахождении в аэрозольной форме, а также их закреплении на поверхности сорбента [7].

Пробы почв отбирались по слоям с глубины 0–5 и 5–20 см с таким расчетом, чтобы каждая представляла собой часть, типичную для генетических горизонтов или слоев данного типа почвы. Отбор проб и пробоподготовка проведены согласно [9]. лабора-

торные испытания проводились с соблюдением требований государственных стандартов на сертифицированном оборудовании и с применением методик, получивших соответствующую аккредитацию. В процессе исследований было учтено воздействие специфических и неспецифических углеводородных соединений, которые присутствуют в почвенном гумусе. Для определения количества и идентификации загрязнения почв НП использовали [10].

Результат определения содержания НП в почве  $X_{изм}$ , мг/кг, рассчитывали по формуле

$$X_{изм} = \frac{C_{изм} \times V \times V_2 \times V_{элюат}}{M \times V_2 \times V_{ал}}, \quad (1)$$

где  $C_{изм}$  – показания прибора, мг/дм<sup>3</sup>;

$M$  – масса навески образца для анализа, кг;

$V$  – суммарный объем экстракта, дм<sup>3</sup>;

$V_1$  – объем экстракта, взятый для разбавления, дм<sup>3</sup>;

$V_2$  – объем экстракта, полученный после разбавления, дм<sup>3</sup>;

$V_{ал}$  – объем аликвоты экстракта, введенного в хроматографическую колонку, дм<sup>3</sup>;

$V_{\text{элюат}}$  – объем элюата, полученного после пропускания экстракта через колонку,  $\text{дм}^3$ .

После установления исходной концентрации НП в исследуемых загрязненных почвах, проводили испытания на них биосорбента. В колбы на  $200,0 \text{ см}^3$  добавляли по 1000 мг почвенных образцов. После чего засеивались клетками штамма до концентрации  $1-10^9 \text{ кл./см}^3$ . Контрольной выступала среда без добавления микроорганизмов для определения общих потерь. Эксперимент

проводился в трех повторностях при комнатной температуре в течение недели.

Биодеградационную активность (БА), %, в отношении НП рассчитывали по формуле

$$BA = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \%, \quad (2)$$

где БА – биодеградационная активность, %;  
 $m_1$  – масса нефтепродуктов в пробе, мг;  
 $m_2$  – масса нефтепродуктов в биопробе после 7 дней, мг.

**Таблица 2**

План эксперимента

Номер пробы	Место отбора пробы	Используемый сорбент
1	Почва + нефть	«Biteoil»
2	Почва + нефть	«Biteoil»
3	Почва + нефть	«Biteoil»
4	Почва + нефть	«С-ВЕРАД»
5	Почва + нефть	«С-ВЕРАД»
6	Почва + нефть	«С-ВЕРАД»
7	ГНПС* «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов, фоновая точка	–
8	ГНПС «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов, т. 1	«Biteoil»
9	ГНПС «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов, т. 2	«Biteoil»
10	ГНПС «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов, т. 3	«С-ВЕРАД»
11	ГНПС «Куюмба» площадка временного размещения отходов нефтешламов, т. 4	«С-ВЕРАД»
12	ГНПС «Куюмба» камера СОД**, фоновая точка	–
13	ГНПС «Куюмба» камера СОД, т. 5	«Biteoil»
14	ГНПС «Куюмба» камера СОД, т. 6	«С-ВЕРАД»
15	ГНПС «Куюмба» площадка ремонта, фоновая точка	–
16	ГНПС «Куюмба» площадка ремонта, т. 7	«Biteoil»
17	ГНПС «Куюмба» площадка ремонта, т. 8	«С-ВЕРАД»
18	НПС-2***, камера СОД, фоновая точка	–
19	НПС-2, камера СОД т. 9	«Biteoil»
20	НПС-2, камера СОД т. 10	«С-ВЕРАД»
21	НПС-3, камера СОД, фоновая точка	–
22	НПС-3, камера СОД т. 11	«Biteoil»
23	НПС-3, камера СОД т. 12	«С-ВЕРАД»
24	НПС-4, камера СОД, фоновая точка	–
25	НПС-4, камера СОД т. 13	«Biteoil»
26	НПС-4, камера СОД т. 14	«С-ВЕРАД»
27	ГНПС «Тайшет», камера СОД, фоновая точка	–
28	ГНПС «Тайшет», камера СОД т. 15	«Biteoil»
29	ГНПС «Тайшет», камера СОД т. 16	«С-ВЕРАД»

Примечание: \*ГНПС – головная нефтеперекачивающая станция; \*\*СОД – система очистки и диагностики трубопровода; \*\*\*НПС – нефтеперекачивающая станция.

Пробы 1–6 брали на площадке аварийного разлива НП размером 5x5 м ремонтного участка, где произошел разлив нефтепродуктов. Место отбора исследуемых проб и используемых сорбентов представлено в табл. 2.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты эксперимента с использованием сорбентов «Viteoil» и «С-ВЕРАД» в лабораторных условиях представлены в табл. 3.

Проведенное лабораторное испытание подтвердило большую эффективность применения сорбента «Viteoil» для удаления неф-

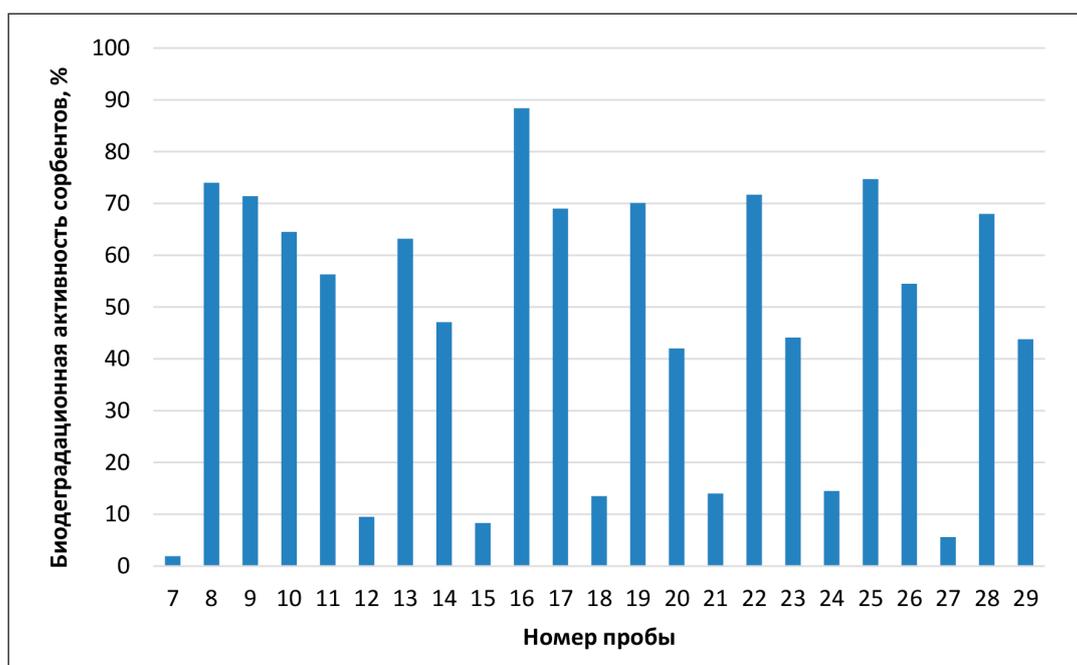
тяных загрязнений с почвенного покрова. Установлено, что оба препарата эффективно справляются с задачей очистки почв, однако сорбент «Viteoil» демонстрирует биодеградационную эффективность на 27,1% большую по сравнению с «С-ВЕРАД».

Для исследования эффективности сорбентов в полевых условиях были отобраны пробы с 22 точек. Препарат вносили в концентрации 200 г на 1 м<sup>2</sup>, при глубине загрязнения 20 см на 60 суток. На рисунке представлены результаты исследований биодеградационной активности сорбентов на контрольных и фоновых точках в полевых условиях.

Таблица 3

Эффективность использования сорбентов «Viteoil» и «С-ВЕРАД» в лабораторных условиях

Номер пробы	Проба	Содержание нефти, мг/кг		Биодеградационная активность, %
		до внесения биосорбента	через 7 суток после внесения сорбента	
1	Почва + «Viteoil»	22397±5599	2545±636	88,6
2	Почва + «Viteoil»	47412±11853	5089±1272	89,3
3	Почва + «Viteoil»	23045±5761	6993±1748	69,7
Среднее значение		30951±7737	4875±1218	82,5
4	Почва + «С-ВЕРАД»	26412±6603	11255±2814	57,4
5	Почва + «С-ВЕРАД»	30854±7714	16558±4140	46,3
6	Почва + «С-ВЕРАД»	39565±9891	14851±3713	62,5
Среднее значение		32274±8069	14221±3555	55,4



Биодеградационная активность сорбентов в полевых условиях

Благодаря высокой удельной поверхности и повышенной твердости, а также свободной сыпучести субстрата-носителя «Viteoil» возможно структурирование очищенной почвы и повышение доступа кислорода для микрофлоры почвы, что способствует формированию центров активной деструкции НП в почве. Минеральные составляющие субстрата-носителя и самого субстрата для бактерий предоставляют необходимые макро- и микроэлементы, которые активизируют нефтеокисляющие и азотфиксирующие микроорганизмы в мерзлотной почве. Это способствует увеличению жизнеспособности полезной микрофлоры в условиях короткого вегетационного периода и сокращению времени восстановления нарушенной экологической системы. Таким образом, потребность в минеральных удобрениях при биоремедиации нефтезагрязненных почв на Крайнем Севере значительно сокращается.

По результатам исследований в разных местах отбора проб почв видно, что характер сорбционной активности препаратов отличается. Причиной этому могут быть:

- уменьшение толщины пленки НП (уменьшается нефтеемкость сорбентов в связи с уменьшением площади поверхности взаимодействия с нефтью);

- повышение вязкости нефти при понижении температуры препятствует сорбции.

В полевых условиях при стабильных положительных температурах использование в течение двух месяцев биосорбента «Viteoil» позволило уменьшить уровень загрязнения НП в почве с 2000 до 200 мг/кг.

### Выводы

1. Изучили биологические методы очистки почвы от НП с использованием сорбентов «С-ВЕРАД» и «Viteoil».

2. Выяснили, что биопрепарат «Viteoil» на основе консорциума микроорганизмов-нефтедеструкторов, нанесенный на торфо-минеральный субстрат, позволяет избежать распространения загрязняющих веществ на природных территориях, вплоть до локализации загрязнения.

3. Установили преимущество биопрепарата «Viteoil» по сравнению с сорбентом минерального происхождения по степени

очистки почв от НП (до 87–88%) в районе нефтепровода «Куюмба – Тайшет» за короткий промежуток времени (60 суток).

### Список литературы

1. Тучкова О.А., Гасилов В.С. Разливы нефти и нефтепродуктов. Часть 1. Основные положения разработки Планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2016. № 21. С. 69–72.

2. Апкин Р.Н., Минакова Е.А. Экологический мониторинг: учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Казань: КГЭУ, 2015. 127 с.

3. Правительство Российской Федерации. Постановление об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации: утвержден Постановлением Правительства Российской Федерации 31 декабря 2020 года № 2451.

4. Половков С.А., Николаева А.В., Дегтярева С.С., Дунаева А.С., Радченко А.Н., Шестаков Р.Ю. Технология ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на воде и почве с использованием биосорбента и биопрепарата, разработанных ООО «НИИ Транснефть» / Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. М., 2017. С. 72–74.

5. Мухин В.М. Пути решения экологических проблем в нефтяном комплексе // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 1 (54). С. 65–67.

6. ОР-13.020.30-КТН-138-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Производственный эколого-аналитический контроль за состоянием компонентов окружающей среды. Порядок планирования и организации работ. 2014. 79 с.

7. Рожкова С.А., Черняева И.А., Солтон О.Л., Николаева А.В., Кардакова Т.С., Козьминных А.Н., Комоско Г.В., Кузнецов С.М. Биосорбент для очистки почвы и воды от нефти и нефтепродуктов // Патент РФ № 2015142416. 2017. Бюл. № 10. Заявл. 06.10.2015; опубл. 21.08.2017. 2 с.

8. Макаре Н.В., Соболева С.В., Воронин В.М. Исследование загрязнения почвенного покрова при добыче и транспортировке товарной нефти / Решетневские чтения. Материалы XXVI международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Ч. 1. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2022. С. 778–780.

9. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа М.: Стандартинформ, 2018. 9 с.

10. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. Издание официальное: утвержден и введен Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды от 10 ноября 1998 г. № 711-ств введен впервые Тюменским государственным университетом. 2021. 18 с.