



Научная статья

Комбинированный метод фиторемедиации и электрообработки для очистки загрязненных территорий нефтяного комплекса

Н.С.ШУЛАЕВ, Р.Р.КАДЫРОВ, В.В.ПРЯНИЧНИКОВА✉

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Как цитировать эту статью: Шулаев Н.С., Кадыров Р.Р., Пряничникова В.В. Комбинированный метод фиторемедиации и электрообработки для очистки загрязненных территорий нефтяного комплекса // Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 147-155. EDN WJRQDO

Аннотация. Масштабность загрязнения земель нефтяными отходами обуславливает необходимость применения экономических и эффективных методов их рекультивации. Фиторемедиация – один из наиболее простых методов, но обладает рядом ограничений, поэтому перед ее проведением зачастую требуется дополнительная подготовка территории. Интерес представляют предварительная электроподготовка и последующий высев специальных фиторемедиантов. Пропускание через объем почвы постоянного электрического тока под небольшим напряжением удаляет токсиканты из глубоких почвенных слоев даже в случае обводнения, а также снижает их содержание в верхнем слое, где расположена корневая система растений, что создает более комфортные условия для фиторемедиантов. Адекватно подобранные виды растительности обеспечат доочистку почвы, улучшат ее структуру и воздушный обмен. Приведены результаты исследований по двум направлениям. Эксперименты по изучению устойчивости растений к различному загрязнению почвенного субстрата сырой нефтью позволили установить пороговые значения контаминации, при которых целесообразен посев конкретного вида, и выбрать оптимальные фитомелиоранты. Изучение очистки нефтесодержащего грунта в монокатодоцентрической электрохимической установке с фиксированием основных характеристик (концентрации нефтепродуктов, температуры грунта, вольт-амперных характеристик) позволяет прорабатывать технические мероприятия по подготовке территорий с учетом особенностей ландшафта к фиторемедиации.

Ключевые слова: фиторемедиация; электрохимическая очистка; нефтезагрязненный грунт; засоление; электрический ток; напряжение; растения; эффективность очистки

Благодарность. Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Приоритет 2030» (национальный проект «Наука и университеты»).

Поступила: 30.10.2022

Принята: 20.09.2023

Онлайн: 03.10.2023

Опубликована: 29.02.2024

Введение. Загрязнение и деградация почв в результате техногенной деятельности являются одной из острых экологических проблем. По данным официального доклада МПР в 2020 г. общая территория нарушенных земель в РФ достигла величины 1084,6 тыс. га и продолжает расти (годовой прирост до 7,7 тыс. га). Большая часть нарушенных территорий относится к категории земель промышленности и иного назначения. Перечень основных загрязняющих веществ в почвах варьируется в зависимости от преобладающих отраслей (тяжелые металлы и нефтепродукты, остаточные пестициды и соли). В нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих регионах приоритетными загрязнителями являются нефтепродукты и сопутствующие им разнообразные солевые растворы. Точная оценка площади земель, загрязненных нефтепродуктами, не представляется возможной из-за трудности идентификации относительно небольших локальных утечек и разливов [1]. Среди оказываемых на среду негативных эффектов от поступления нефтепродуктов – нарушение водно-воздушного баланса, оглеение, укрупнение почвенных структурных элементов, нарушение несущей способности почв, подавление микро- и мезофауны [2-4]. Существует широкий спектр почвоочистных и восстановительных технологий, имеющих свои особенности, однако максимальная эффективность обеспечивается при их комбинировании с учетом специфичности решаемых в полевых условиях задач [5-9].



Одним из наиболее экономически выгодных направлений является фиторемедиация почв, т.е. применение растений для удаления загрязняющих веществ и улучшения свойств почв [10-12]. Однако она не всегда обеспечивает достаточно быструю и эффективную очистку – интенсивность фиторемедиации существенно зависит от температуры почвенно-воздушной среды, режима освещенности, наличия биогенных элементов, формы, в которой токсиканты находятся в грунте, и др. [13-16]. Следует учитывать, что способность растений поглощать химические вещества изменяется при фитогеохимическом стрессе [17]. Улучшить качество и скорость восстановления пострадавших земель позволяет сочетание фиторемедиации с предварительной подготовкой территории посредством реализации других рекультивационных технологий [18-22].

Значительный интерес представляет предварительная подготовка контаминированного участка за счет пропуска постоянного тока через почвенный массив для удаления токсикантов и дальнейший высеv на нем растений-фиторемедиантов [23-26].

Процессы, индуцированные в почве при пропускании электрического тока, подготавливают поверхностный слой к чувствительным растениям-фиторемедиантам и сокращают содержание токсичных компонентов на глубине. Для этого в почвенном массиве передвижными бурильными установками или ручным буром готовятся скважины с учетом степени вертикального распространения нефтепродуктов. В скважины монтируются катоды и аноды, соединенные с источником электроэнергии. Возникающие при включении источника малые токи стимулируют электроокислительные [27-30] и электрокинетические реакции [31-34], способствуют разрушению устойчивых комплексов и трансформации токсикантов в более биодоступные формы и вызывают ряд других физико-химических явлений [35]. Размеры, состав и фактура электродов подбираются с учетом свойств почвогрунта, особенностей горизонтального и вертикального распределения токсикантов, требуемого временного интервала обработки и других условий. Результатом проведения электрофиторемедиации будет удаление разных компонентов (от нефтепродуктов до тяжелых металлов, обессоливание). Во избежание закисления почв в процессе электрообработки практикуется периодическая смена полярности электродов.

Цель работы – на основе анализа и обобщения экспериментальных данных установить пороговые значения нефтяного загрязнения, при которых возможно прорастание семян и дальнейший рост изучаемых растений; подобрать оптимальные для вариативных условий рельефа и обводнения толерантные виды растительности; изучить специфику энергоэффективной подготовки почв к видам – фиторемедиантам за счет предварительной электрохимической очистки.

Представленные материалы исследований направлены на проработку технологии комплексного восстановления грунтов, загрязненных нефтяными отходами, за счет высева представителей высшей флоры с предварительной почвоподготовкой посредством электрофиторемедиации с учетом неравномерности рельефа и степени увлажнения.

Рассматриваемый комбинированный метод восстановления территории может реализовываться на различных почвах. На этапе фиторемедиации осуществляется выбор вида растительности (из изученных), оптимального для конкретных условий, а также при необходимости возможно проведение дополнительных мероприятий по улучшению почвенной структуры (мульчирование, внесение органических удобрений, глинование и т.п.). Электрохимическая обработка применима как на песчаной почве, так и на суглинке и глине.

В ранних работах авторов рассматривалась возможность выращивания некоторых видов растительности на нефтезагрязненных грунтах [36], были установлены общие закономерности электроиндуцированного уменьшения содержания нефтепродуктов в почвогрунтах [37, 38]. Данная работа продолжает и расширяет цикл исследований в этих сферах.

Методология. Первый этап экспериментального исследования включал проведение опытов по изучению устойчивости некоторых видов высшей растительности к нефтяному загрязнению путем их прорастивания на почве с различными концентрациями нефти и определения процента всхожести семян. Конечной целью данных опытов был выбор видов растений умеренной зоны, толерантных к нефтяному загрязнению, и определение пороговых значений содержания токсиканта при их прорастании. Второй этап включал обработку нефтезагрязненного грунта электрическим током на экспериментальной лабораторной установке с оценкой степени очистки и мониторингом напряжения между электродами, температурой и кислотностью грунта, позволяющим



судить об интенсивности и особенностях протекания очистки. Проведение данного этапа направлено на разработку эффективных мероприятий по предварительной подготовке сильнозагрязненных нефтесодержащих грунтов для последующего подбора фиторемедиантов.

Эксперименты проводились с модельным грунтом на основе выщелоченного чернозема. Во всех случаях для загрязнения грунта использовалась нефть с плотностью $0,876 \text{ г/см}^3$ и содержанием, % по массе: серы – 2,95, парафинов – 3,1, смол – 14,6, механических примесей – 0,880. Для различных серий экспериментов готовились вариации модельного грунта, состав которых соответствовал загрязненной почве, отобранной с мест разливов при добыче нефти на месторождении Республики Башкортостан. Исследования проводились при температуре воздуха 20°C и атмосферной влажности 67 %.

Первый этап. Эксперименты по определению устойчивости видов высшей растительности к нефтяному загрязнению почв проводились в лабораторных условиях в весенне-летний период, а также с применением климатической камеры LCC-1000MP Diahan Labtech – в осенне-зимний (для уточнения результатов). В климатической камере поддерживалась освещенность порядка 4000 лк с соблюдением фотопериода «день – ночь». Реакция растений исследовалась методом проращивания семян в модельных грунтах с различной концентрацией токсиканта с расчетом процента всхожести и дальнейшим определением количества жизнеспособных проростков.

Сначала подготавливалась почва (выщелоченный чернозем): выборка корней и мелких камней, просеивание, взвешивание. В пластиковые контейнеры засыпалось по 100 г почвы. В каждую пробу при помощи пипетки вносили сырую нефть объемом 1; 2; 5; 10; 50; 100 мл, далее почва тщательно перетиралась и перемешивалась для равномерного распределения загрязняющего вещества. В каждый контейнер высевалось по 20 семян так, чтобы покрывающий их слой почвы составлял примерно 1 см. Затем осуществлялся полив 60 мл водопроводной воды. Контролем служила почва, не загрязненная нефтью. Для экспериментов готовилось по три пробы с каждой дозой нефти. Контейнеры выдерживались при температуре 20°C и режиме освещенности, соответствующему дневному весенне-летнему периоду. Через семь дней подсчитывалось количество проростков в каждом контейнере и определялся процент всхожести (рис.1). Через две недели повторно подсчитывалось количество жизнеспособных ростков для определения их выживаемости.

Полученные результаты использовались для выявления основных эффектов, оказываемых токсикантом в разных объемах на показатель всхожести, с дальнейшей детальной статистической обработкой.

Второй этап. Электрообработка загрязненного грунта, которая проводилась на лабораторной установке с цилиндрической ячейкой, центрическим размещением катода и периферийным размещением анодов (рис.2).

При проведении рекультивации аварийных разливов на месторождениях следует учитывать, что лимитирующим фактором развития растений становится не только нефть, но и зачастую пластовые воды, содержащие большое количество минеральных солей. Важно, чтобы технология предварительной подготовки загрязненной территории к посеву фиторемедиантов не только снижала количество нефтепродуктов, но и обессоливала почву. Поэтому при проведении экспериментов по электрообработке почвы готовились варианты модельного грунта, содержащего нефть (1 и 10 % по массе) и раствор солей (40,8 % по массе). Состав солевого раствора соответствовал пластовым водам месторождения [39], мг/кг: хлорид натрия – 86000, хлорид кальция – 10500, хлорид магния – 5200, сульфат натрия – 4000, гидрокарбонат натрия – 400.



Рис.1. Контейнеры с проростками тестируемых *Ipomoea purpurea* (первый ряд слева) и *Fagopyrum esculentum* (2-4 ряды)

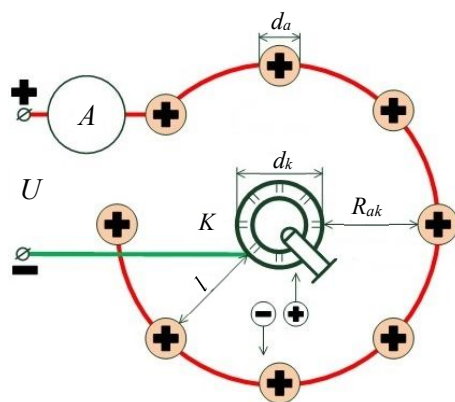


Рис.2. Схема установки центрального катода и периферийных анодов

d_a – диаметр анодов; d_k – диаметр катода;
 l – межэлектродное расстояние; R_{ak} – расстояние между центрами катода и анодов; K – центральный катод; U – напряжение между катодом и анодами



Центральный элемент электрохимической ячейки – стальной полый цилиндрический катод с перфорацией по цилиндрической поверхности (при необходимости подключается водоотводная арматура для удаления почвенного электрофоретического потока). По периметру радиальной ячейки, на равном удалении от катода, устанавливаются аноды. Все электроды соединяются с соответствующим полюсом источника электроэнергии.

Характеристики используемой в опытах установки: диаметр электрохимической ячейки – 0,3 м; высота слоя грунта – 0,1 м; катод выполнен из перфорированной стальной трубки, аноды (диаметр 2,5 см) представляют собой сетчатые цилиндры (трубки) из титана с оксидно-рутениевым покрытием; вместимость ячейки достигала 3 кг модельного грунта.

Проведено несколько серий экспериментов по пропусканию токов через чернозем, содержащий разные объемы нефти. При проведении экспериментов поддерживалась сила тока постоянной величины: в серии опытов с 1 %-ным загрязнением грунта – 0,8 А, в серии с 10 %-ным загрязнением – 1 А. Использование данных значений силы тока в каждом случае обусловлено тем, что они являются минимальными, при которых фиксируется изменение напряжения между электродами, значит, можно говорить о появлении электроиндуцируемых процессов. Период пропускания электрического тока составлял 360 мин.

Содержание нефтепродуктов в почве определялось методом ИК-спектроскопии на канцелярном КН-2м. Параметры напряжения, температуры, влажности и кислотности фиксировались каждые 30 мин в прикатодной, прианодной и межэлектродной областях. Для этого использовались мультиметр, прибор тепловизионной съемки RGK, цифровой анализатор влажности почвы MC-7828SOIL, измерители почвенной температуры и влажности HI9921. Мониторинг динамики показателей позволяет судить об интенсивности электрофизических реакций.

Обсуждение результатов. Эксперименты по изучению реакции растений на загрязнение почв, проводившиеся в течение нескольких лет, позволили выявить несколько видов, устойчивых к присутствию токсикантов (*Typha latifolia*, *Phragmites communis* [36], *Fagopyrum esculentum* и *Ipotoea purpurea*). Эти виды имеют различные экологические ниши, что позволяет применять их на разнообразных по своим свойствам территориях.

При статистической обработке результатов во всех случаях установлены достоверные обратные зависимости всхожести семян от концентрации загрязняющих веществ (рис.3). Семена вьюна ипомеи и гречихи прорастали более равномерно, причем состояние проростков в одинаковых пробах тоже было более однородным.

Экспериментально полученные данные об уровне содержания токсикантов, при котором всхожесть семян равна значениям в контрольных (незагрязненных) образцах или превышает их, т.е. проявляется стимулирующий эффект, обобщены в таблице. Эти значения можно принять как пороговый уровень загрязнения, при котором эффективно использование конкретного вида растительности на нефтезагрязненных грунтах. Влаголюбивые рогоз и тростник дополнительно прорастали в присутствии пластовых вод и прорастали при содержании 5 мл в пробе.

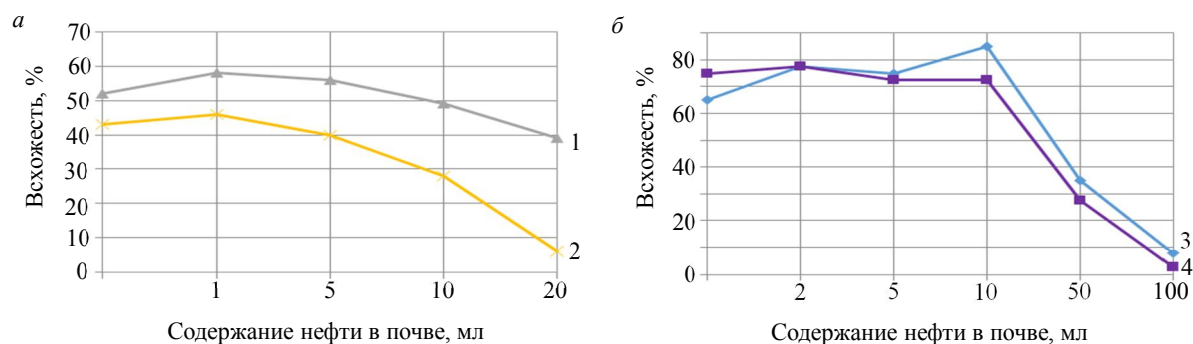


Рис.3. Графики зависимости всхожести семян растений от содержания нефти в почве:
а – эксперименты с рогозом широколистным (1) и тростником обыкновенным (2);
б – эксперименты с гречихой посевной (3) и вьюном ипомеи (4)



Основные параметры проращивания

Параметр	<i>Typha latifolia</i>	<i>Phragmites communis</i>	<i>Fagopyrum esculéntum</i>	<i>Ipomoea purpurea</i>
Всхожесть семян в контроле, %	52	43	65	75
Объем нефти в пробе (всхожесть не менее контроля), мл	10	5	10	2
Объем нефти в пробе при нулевой всхожести, мл	30	30	100 (единичный проросток)	100 (единичный проросток)
Уравнение регрессии, описывающее зависимость	$y = -2,642x^2 + 12,35x + 42,8$	$y = -4x^2 + 14,8x + 32,2$	$y = -6,964x^2 + 37,17x + 33$	$y = -5,312x^2 + 22,54x + 56,25$
Достоверность аппроксимации	$r^2 = 0,988$	$r^2 = 0,999$	$r^2 = 0,918$	$r^2 = 0,955$

Во всех сериях экспериментов проростки оставались жизнеспособными через 14 дней после появления (период мониторинга их состояния), сохраняя зеленую окраску без каких-либо повреждений листовых пластинок или пожелтения. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о высокой устойчивости всех четырех видов к нефтяному загрязнению. Эти виды могут использоваться для высева на загрязненных территориях для улучшения почвенных свойств как самостоятельно, так и при проведении финишного этапа комплексной рекультивации (в нашем случае после проведения предварительной очистки почвы электрохимическим методом).

Typha latifolia и *Phragmites communis* являются влаголюбивыми дикорастущими широко распространенными растениями и могут применяться для рекультивации нефтезагрязненных низменностей, болотистых участков. Их посев может проводиться на нефтяных месторождениях в местах разливов нефти и пластовых вод. Если посев осуществляется в засушливый летний период, то на начальном этапе роста необходимо создать систему орошения. Для данных видов характерно снижение содержания нефтепродуктов в прикорневой области, в том числе за счет повышенной активности углеводородоокисляющих микроорганизмов [40].

Также перспективным представляется применение после электрообработки *Amaranthus retroflexus* L., являющегося повсеместно встречающимся сорным растением, обладающего устойчивостью к повышенному содержанию в почве нефтепродуктов и минеральных солей (эксперименты планируются).

Ipomoea purpurea, являясь вьющимся декоративным растением, пригодна для использования в городских условиях при умеренном увлажнении, например для посева после электрообработки на почвах автозаправочных станций, вдоль дорог с участками разливов горюче-смазочных материалов и т.п.

Fagopyrum esculéntum относится к пищевым и медоносным культурам, однако в контексте исследований рекомендуется ее использование исключительно в качестве агротехнической культуры, так как обладает очень интенсивным обменом продуктами метаболизма между корнями и листьями [41]. Вопрос накопления вредных продуктов трансформации токсикантов в различных частях растения требует изучения, поэтому при его использовании для финишной ремедиации растение рационально не употреблять в пищу.

Все изученные виды являются неприхотливыми к условиям среды, часто встречаются в умеренной зоне, семенной материал легко собирать в полевых условиях (значительные траты на его закупку не требуются).

Исследования очистки нефтесодержащего грунта малыми токами с катодоцентрическим размещением электродов, предваряющими дальнейшую фиторемедиацию, показали значительную эффективность. Во всех случаях наблюдалось снижение уровня загрязнения нефтепродуктами в электрообрабатываемом грунте (степень очистки 47-65 %), при этом постепенно происходит перераспределение нефтепродуктов по межэлектродным зонам – повышение их содержания у катода и снижение у анода (рис.4).

При пропускании электрического тока через грунт с 1 %-ным загрязнением напряжение возрастало с 8,9 до 9,4 В, с 10 %-ным – варьировалось в пределах 9,8-10,9 В. Наблюдается повышение температуры грунта в прикатодной зоне (температурный градиент до 8 °С), при этом в анодной и

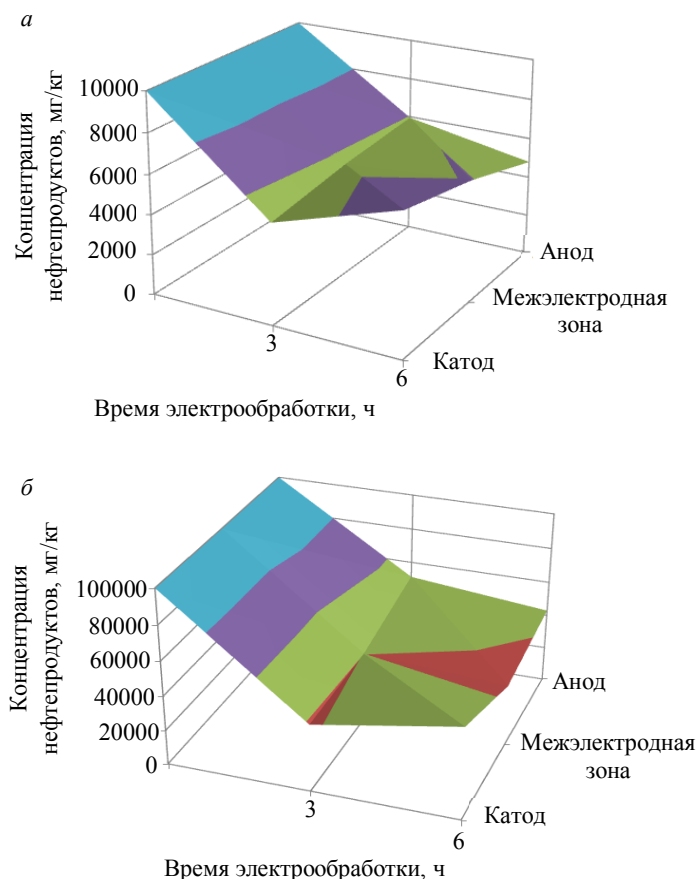


Рис.4. Пространственно-временное распределение концентрации нефтепродуктов в грунте в различных сериях экспериментов:
 а – минимальный уровень загрязнения (1 %);
 б – максимальный уровень загрязнения (10 %)

средней зонах температура практически одинакова (рис.5). Применение тепловизора позволяет анализировать температурный профиль грунта в ячейке. Выделяемые на снимках температурные зоны позволяют оценить электропроводимость отдельных участков, более высокий нагрев свидетельствует о повышении сопротивления среды и уменьшении электропроводимости (область с белокрасной окраской на рис.5). Это означает, что на данном участке идет диссоциация солей, миграция и уменьшение количества активных ионов, т.е. происходит обессоливание. Это подтверждает и распределение pH, у катода образуется щелочная среда в результате поступления гидроксильных ионов, в остальной части ячейки кислотность увеличивается.

Для оценки энергозатрат указанного метода на катодоцентрических установках с учетом изменения параметров нефтезагрязненных грунтов (в частности удельного сопротивления) в процессе электрообработки необходимо использовать расчетные формулы. В общем случае энергетические параметры проведения электрохимической очистки с монокатодным центрическим расположением электродов (в том числе в полевых условиях) будут определяться таким образом. Суммарный ток между анодами и катодом определяется по формуле [37]

$$I = \frac{USN}{\rho l}, \quad (1)$$

где N – число анодов, шт.; ρ – удельное сопротивление обрабатываемой почвы, Ом·м; l – межэлектродное расстояние между центральным катодом и анодами, м.

Эффективная площадь канала электрического тока между противоположно заряженными электродами определяется следующим образом:

$$S = \frac{d_k + d_a}{2} H, \quad (2)$$

где H – глубина загрязнения, м.

Межэлектродное расстояние рассчитывается по формуле

$$l = R_{ak} - \frac{d_k + d_a}{2}. \quad (3)$$

Удельные затраты электроэнергии (Дж/кг нефтепродуктов) определяются по формуле

$$\varepsilon_{уд} = \frac{1}{c_0 V} \int U I dt, \quad (4)$$

где V – объем нефтезагрязненного грунта, м³; c_0 – начальная концентрация нефтепродуктов, кг/м³.

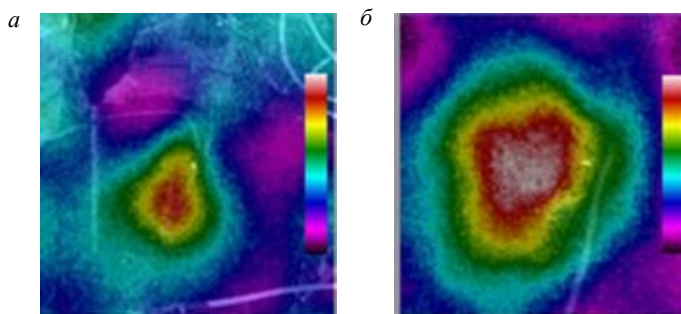


Рис.5. Тепловизионная съемка радиальной ячейки с грунтом: начальная (а) и завершающая (б) стадии обработки



Как следует из экспериментальных исследований [39], удельное сопротивление грунта в процессе электрообработки возрастает. В первом приближении изменение во времени удельного сопротивления можно оценить по формуле

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t); \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_0} \frac{I}{q_{уд} c_0 V}, \quad (6)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление грунта в начальный момент времени, Ом·м; ρ_k – конечное значение удельного сопротивления грунта на завершающем этапе электрообработки, Ом·м; $q_{уд}$ – удельное значение электрического заряда, которое должно обеспечивать очистку грунта от нефтепродуктов, Кл/кг, величины $q_{уд}$ установлены ранее для глины, песчаного грунта и чернозема [39].

В зависимости от режимов электрообработки, при которых поддерживаются постоянными либо напряжение между анодами и катодом, либо электрический ток между электродами, удельные энергозатраты будут определяться приведенными следующими соотношениями – при заданном напряжении из формул (4) и (5):

$$\varepsilon_{удU} = \frac{1}{c_0 V} \int \frac{U^2 dt}{R} = \frac{1}{c_0 V} \int \frac{U^2 S dt}{\rho_0 (1 + \alpha t) l} = \frac{1}{c_0 V} \frac{U^2 S}{\rho_0 l} \int \frac{dt}{(1 + \alpha t)} = \frac{1}{c_0 V} \frac{U^2 S}{\rho_0 l \alpha} \ln(1 + \alpha t); \quad (7)$$

при постоянном токе между электродами

$$\varepsilon_{удI} = \frac{1}{c_0 V} \int I^2 \rho_0 (1 + \alpha t) \frac{l}{S} dt = \frac{1}{c_0 V} I^2 \rho_0 \frac{l}{S} \left(t + \frac{\alpha t^2}{2} \right). \quad (8)$$

Расчет энергоэффективности лабораторной установки с использованием приведенных формул и полученных экспериментальных данных показал, что удельные энергозатраты составляют 0,1139 МДж на 1 кг грунта с содержанием 1 % нефти.

Приведенную методику определения энергозатрат можно использовать при проектировании специализированных установок по электроочистке для конкретных условий с учетом свойств нефтезагрязненных участков и степени их загрязнения.

Заключение. Проведенные экспериментально-теоретические исследования по двум обозначенным областям позволили выявить основные подходы для реализации комплексной технологии восстановления земель, содержащих нефтяные отходы.

Подобрано четыре вида растений – потенциальных толерантных фитомелиоранта, пригодных для восстановления нефтезагрязненных грунтов различных территорий. Определены пороговые значения содержания нефтепродуктов в грунте, при которых рекомендуется проводить фиторемедиацию. Установлены достоверные зависимости всхожести семян от содержания нефтепродуктов. На основе полученных данных предлагается использовать виды *Typha latifolia* и *Phragmites communis* на высокоувлажненных почвах, в том числе в котловинах и оврагах, заполненных водой с нефтяной эмульсией и рассолами нефтедобычи (всхожесть, достигающая и превышающая контроль при содержании нефти до 10 и 5 мл в пробе). Вид *Ipotomea purpurea* целесообразно использовать в городских зонах (пороговый объем нефти в пробе 2 мл), а вид *Fagopyrum* – на умеренно увлажненных территориях сельскохозяйственного назначения, подвергшихся разливам нефти (пороговый объем 10 мл в пробе).

Для предварительной подготовки участка к фиторемедиации и снижения содержания нефтепродуктов до пороговых значений, характерных для конкретных видов, рекомендуется проводить электрохимическую очистку почв с использованием монокатодной центрической схемы размещения электродов. Данная схема размещения электродов позволит эффективно подготовить почву даже при значительной изрезанности ландшафта, т.е. при наличии низменностей и возвышенностей в пределах участка рекультивации, в обводненных местах. Степень удаления нефтепродуктов



в соответствии с проведенными опытами достигла 65 %. Температурный градиент при электроразогреве грунта составил до 8 °С. Разработана методика определения некоторых энергетических параметров процесса электроремедиации при использовании катодоцентрической схемы расположения электродов с учетом изменения сопротивления грунта.

Полученные результаты будут способствовать практической реализации технологии комплексной очистки нефтезагрязненных грунтов на основе фиторемедиации с предварительной электрообработкой в реальных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич М.А., Быкова М.В. Исследование возможности повышения точности измерений при установлении уровня загрязнения почв нефтепродуктами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 4. С. 67-86. DOI: [10.25018/0236_1493_2022_4_0_67](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_67)
2. Пашкевич М.А., Анциферова Т.А. Оценка степени воздействия предприятий топливно-энергетического комплекса на окружающую природную среду при укрупнении // Записки Горного института. 2013. Т. 203. С. 229-232.
3. Дашко Р.Э., Ланге И.Ю. Прогнозирование изменения несущей способности песчано-глинистых грунтов в процессе их контаминации нефтепродуктами // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 16-21.
4. Пашкевич М.А., Бек Дж., Матвеева В.А., Алексеенко А.В. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 125-130. DOI: [10.31897/PMI.2020.1.125](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.125)
5. Wukui Zheng, Tian Cui, Hui Li. Combined technologies for the remediation of soils contaminated by organic pollutants. A review // Environmental Chemistry Letters. 2022. Vol. 20. Iss. 3. P. 2043-2062. DOI: [10.1007/s10311-022-01407-y](https://doi.org/10.1007/s10311-022-01407-y)
6. Yan Xu, Yangjie Lu, Chang Tian, Jianqiang Yang. Application of combined remediation in heavy metal polluted soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 300. № 032006. DOI: [10.1088/1755-1315/300/3/032006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/3/032006)
7. Guoxuan Fan, Xitao Liu, Xiaowan Li et al. Mechanochemical treatment with CaO-activated PDS of HCB contaminated soils // Chemosphere. 2020. Vol. 257. № 127207. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.127207](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127207)
8. Ferreira M.B., Sales Solano A.M., Dos Santos E.V. et al. Coupling of Anodic Oxidation and Soil Remediation Processes: A Review // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 19. № 4309. DOI: [10.3390/ma13194309](https://doi.org/10.3390/ma13194309)
9. Dos Santos E.V., Sáez C., Cañizares P. et al. Treatment of *ex-situ* soil-washing fluids polluted with petroleum by anodic oxidation, photolysis, sonolysis and combined approaches // Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 310. P. 581-588. DOI: [10.1016/j.cej.2016.05.015](https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.015)
10. Shehata S.M., Badawy R.K., Aboulsoud Y.I.E. Phytoremediation of some heavy metals in contaminated soil // Bulletin of the National Research Centre. 2019. Vol. 43. № 189. DOI: [10.1186/s42269-019-0214-7](https://doi.org/10.1186/s42269-019-0214-7)
11. Tripathi S., Kumar Singh V., Srivastava P. et al. Phytoremediation of organic pollutants: current status and future directions // Abatement of Environmental Pollutants. 2020. P. 81-105. DOI: [10.1016/B978-0-12-818095-2.00004-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00004-7)
12. Красноперова С.А. Морфологический анализ и резистентность растений, рекомендуемых для фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2015. № 4 (44). С. 184-188.
13. Mader A.E., Holtman G.A., Welz P.J. Treatment wetlands and phyto-technologies for remediation of winery effluent: Challenges and opportunities // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 807. Part 1. № 150544. P. 1-17. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.150544](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150544)
14. Mamirova A., Baubekova A., Pidlisnyuk V. et al. Phytoremediation of Soil Contaminated by Organochlorine Pesticides and Toxic Trace Elements: Prospects and Limitations of *Paulownia tomentosa* // Toxics. 2022. Vol. 10. Iss. 8. № 465. DOI: [10.3390/toxics10080465](https://doi.org/10.3390/toxics10080465)
15. Hauptvogel M., Kotrla M., Prčík M. et al. Phytoremediation Potential of Fast-Growing Energy Plants: Challenges and Perspectives – a Review // Polish Journal of Environmental Studies. 2020. Vol. 29. № 1. P. 505-516. DOI: [10.15244/pjoes/101621](https://doi.org/10.15244/pjoes/101621)
16. Macci C., Peruzzi E., Doni S., Masciandaro G. Monitoring of a long term phytoremediation process of a soil contaminated by heavy metals and hydrocarbons in Tuscany // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 424-437. DOI: [10.1007/s11356-019-06836-x](https://doi.org/10.1007/s11356-019-06836-x)
17. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V. et al. Element Accumulation Patterns of Native Plant Species under the Natural Geochemical Stress // Plants. 2021. Vol. 10. Iss. 1. № 33. DOI: [10.3390/plants10010033](https://doi.org/10.3390/plants10010033)
18. Prabakaran K., Li Jian, Anandkumar A. et al. Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review // Ecological Engineering. 2019. Vol. 138. P. 28-37. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2019.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.002)
19. Bajagain R., Lee S., Jeong S.-W. Application of persulfate-oxidation foam spraying as a bioremediation pretreatment for diesel oil-contaminated soil // Chemosphere. 2018. Vol. 207. P. 565-572. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2018.05.081](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.081)
20. Kafle A., Timilsina A., Gautam A. et al. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents // Environmental Advances. 2022. Vol. 8. № 100203. DOI: [10.1016/j.envadv.2022.100203](https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203)
21. Bykova M.V., Alekseenko A.V., Pashkevich M.A., Drebenstedt C. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes // Environmental Geochemistry and Health. 2021. Vol. 43. P. 2331-2346. DOI: [10.1007/s10653-020-00802-0](https://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-0)
22. Strizhenok A.V., Korelskiy D.S., Choi Y. Assessment of the Efficiency of Using Organic Waste from the Brewing Industry for Bioremediation of Oil-Contaminated Soils // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22. Iss. 4. P. 66-77. DOI: [10.12911/22998993/133966](https://doi.org/10.12911/22998993/133966)
23. Rada E.C., Andreottola G., Istrate I.A. et al. Remediation of Soil Polluted by Organic Compounds Through Chemical Oxidation and Phytoremediation Combined with DCT // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. Iss. 17. № 3179. DOI: [10.3390/ijerph16173179](https://doi.org/10.3390/ijerph16173179)
24. Chirakkara R.A., Reddy K.R., Cameselle C. Electrokinetic Amendment in Phytoremediation of Mixed Contaminated Soil // Electrochimica Acta. 2015. Vol. 181. P. 179-191. DOI: [10.1016/j.electacta.2015.01.025](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.01.025)



25. *Cameselle C., Gouveia S.* Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 361. P. 95-102. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2018.08.062](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.062)
26. *Crognale S., Cocarta D.M., Streche C., D'Annibale A.* Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils // *New Biotechnology*. 2020. Vol. 58. P. 38-44. DOI: [10.1016/j.nbt.2020.04.002](https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.04.002)
27. *Rada E.C., Istrate I.A., Ragazzi M. et al.* Analysis of Electro-Oxidation Suitability for Landfill Leachate Treatment through an Experimental Study // *Sewage and Landfill Leachate. Assessment and Remediation of Environmental Hazards*. 2016. P. 149-172. DOI: [10.1201/b20005-13](https://doi.org/10.1201/b20005-13)
28. *Zhou W., Rajic L., Chen L. et al.* Activated carbon as effective cathode material in iron-free Electro-Fenton process: Integrated H₂O₂ electrogeneration, activation, and pollutants adsorption // *Electrochimica Acta*. 2019. Vol. 296. P. 317-326. DOI: [10.1016/j.electacta.2018.11.052](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.11.052)
29. *Ganiyu S.O., Gamal El-Din M.* Insight into in-situ radical and non-radical oxidative degradation of organic compounds in complex real matrix during electrooxidation with boron doped diamond electrode: A case study of oil sands process water treatment // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2020. Vol. 279. № 119366. DOI: [10.1016/j.apcatb.2020.119366](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119366)
30. *Lawrence M.Z., Kenneth J.W., Pamukcu S.* Case study: Electrochemical Geo-Oxidation (ECGO) treatment of Massachusetts New Bedford Harbor sediment PCBs // *Electrochimica Acta*. 2020. Vol. 354. № 136690. DOI: [10.1016/j.electacta.2020.136690](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136690)
31. *Voccianti M., Dovì V.G., Ferro S.* Sustainability in ElectroKinetic Remediation Processes: A Critical Analysis // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 2. № 770. DOI: [10.3390/su13020770](https://doi.org/10.3390/su13020770)
32. *Шабанов Е.А., Простов С.М., Герасимов О.В.* Лабораторные исследования процессов электрохимической очистки грунтов в основаниях эксплуатируемых зданий и сооружений от нефтепродуктов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 4. С. 168-180. DOI: [10.31675/1607-1859-2019-21-4-168-180](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-4-168-180)
33. *Ganiyu S.O., Martínez-Huitle C.A., Rodrigo M.A.* Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2020. Vol. 270. № 118857. DOI: [10.1016/j.apcatb.2020.118857](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118857)
34. *Gingine V., Shah R., Venkata Koteswara Rao P., Hari Krishna P.* A review on study of Electrokinetic stabilization of Expansive soil // *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2013. Vol. 6. № 2 (1). P. 176-181. DOI: [10.13140/2.1.2809.4086](https://doi.org/10.13140/2.1.2809.4086)
35. *Streche C., Cocârță D.M., Istrate I.A., Badea A.A.* Decontamination of Petroleum-Contaminated Soils Using The Electrochemical Technique: Remediation Degree and Energy Consumption // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. № 3272. DOI: [10.1038/s41598-018-21606-4](https://doi.org/10.1038/s41598-018-21606-4)
36. *Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А.* Фиторемедиация нефтезагрязненных почв // *Бутлеровские сообщения*. 2016. Т. 47. № 8. С. 133-138.
37. *Шулаев Н.С., Мешалкин В.П., Пряничникова В.В. и др.* Электрохимическая очистка нефтезагрязненных грунтов с учетом рельефа местности // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 2. С. 9-13. DOI: [10.18412/1816-0395-2022-2-9-13](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-2-9-13)
38. *Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р.* Закономерности электрохимической очистки нефтезагрязненных грунтов // *Записки Горного института*. 2021. Т. 252. С. 937-946. DOI: [10.31897/PMI.2021.6.15](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.15)
39. *Meshalkin V.P., Shulaev N.S., Chelnokov V.V. et al.* Determination of electrical parameters for the electrochemical treatment of soils contaminated with oil // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. № 062069. DOI: [10.1088/1757-899X/537/6/062069](https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062069)
40. *Fahid M., Arslan M., Shabir G. et al.* *Phragmites australis* in combination with hydrocarbons degrading bacteria is a suitable option for remediation of diesel-contaminated water in floating wetlands // *Chemosphere*. 2020. Vol. 240. № 124890. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2019.124890](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124890)
41. *Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Galimova R.Z., Grechina A.S.* Using wastes of buckwheat processing as sorption materials for the removal of pollutants from aqueous media: a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. № 012044. DOI: [10.1088/1757-899X/945/1/012044](https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012044)

Авторы: Н.С.Шулаев, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-3595-6948> (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия), Р.Р.Кадыров, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6665-9375> (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия), В.В.Пряничникова, канд. техн. наук, доцент, prvaleria@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8997-5186> (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.