

*На правах рукописи*



**Шабанов Евгений Анатольевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА  
ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ГРУНТОВ  
ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР**

Специальность: 25.00.36 – Геоэкология  
(горно-перерабатывающая промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» на кафедре теоретической и геотехнической механики

Научный руководитель: **Простов Сергей Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и геотехнической механики Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева

Официальные оппоненты: **Журавлева Наталья Викторовна**,  
доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной и инновационной деятельности АО «Западно-Сибирский испытательный центр» (г. Новокузнецк)

**Хабарова Елена Ивановна**,  
кандидат химических наук, доцент кафедры экологической и промышленной безопасности Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (г. Тула)

Защита диссертации состоится «    » \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.10 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 6, стр. 2, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИТУ «МИСиС» <http://misis.ru/science/dissertations/2018/3397/>.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



С. А. Эпштейн

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Проблема очистки грунтов от нефтезагрязнений на горнодобывающих предприятиях (угольных разрезах, шахтах, рудниках) обусловлена большими объемами потребления топлива автомобильным и железнодорожным транспортом, смазочных материалов при эксплуатации горнодобывающего оборудования, технических масел в электросиловых установках. Основные технологические процессы сопровождаются утечками нефтепродуктов в окружающую среду. Продукты переработки нефти содержат токсичные растворимые в воде фракции, кроме того бензины и особенно автомасла содержат до 20% присадок, растворителей, тяжелых металлов. Один литр отработанного масла может отравить 1 млн л воды, регенерации подвергается не более 60% от объема отходов. В связи с этим нефтепродукты отнесены к перечню маркерных веществ.

Для контроля процессов очистки грунтов от загрязнений применяют прямые и косвенные инструментальные методы. Прямые методы (инфракрасной спектрофотометрии, ультрафиолетовой люминесценции, газовой и газожидкостной хроматографии) предусматривают наличие сложной аппаратуры, значительную продолжительность анализа и обязательное извлечение пробы грунта, при этом погрешность измерений может достигать 40–50%. Оперативный мониторинг необходим как для диагностирования зон загрязнения, так и для контроля процессов, происходящих при очистке грунтового массива от экотоксикантов. Одним из эффективных методов управления свойствами грунтов, особенно малопроницаемых (с коэффициентом фильтрации  $K_f < 10^{-8}$  м/с), является метод электрообработки, основное воздействие которого на загрязненный грунт сводится к электродеструкции экотоксиканта и электроосмотическому перемещению разбавленного загрязнителя в зону механического удаления. Экспериментально-теоретические основы электрохимического метода разработаны применительно к решению задач технической мелиорации (осушения) и закрепления неустойчивых влагонасыщенных грунтов.

Оперативный мониторинг состояния, свойств грунтов и физико-химических процессов в зоне электрообработки может быть обеспечен геофизическими методами, которые являются эффективным дополнением инженерно-геологических изысканий. Весьма перспективными для исследования нефтезагрязненных грунтов являются электрофизические и электромагнитные методы, основанные на измерении параметров электрических полей, поскольку нефть и нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства и поэтому электрически контрастны. До настоящего времени не изучены и не разработаны следующие аспекты проблемы геолого-геофизического мониторинга процессов электрохимической очистки грунтов от загрязнений нефтепродуктами: не обоснованы способы

электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами с учетом структурно-текстурных параметров грунтов, их естественной пористости и влажности; не исследованы закономерности изменения физических и электрических свойств нефтезагрязненных грунтов в зоне электрообработки; не разработаны методики контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений, обеспечивающие рациональные режимы обработки.

На основании изложенного актуальным является развитие экспериментальной, теоретической и методической базы геофизического контроля для совершенствования оперативных методов диагностирования зон нефтезагрязненных грунтов и мониторинга процессов их дезактивации.

Исследования проводились в соответствии с тематическими планами НИР КузГТУ и ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» по хоздоговорным темам №№ 110-2015 и 100-2016, включающим диагностирование аномальных зон в бортах угольных разрезов комплексом геофизических методов, и ООО «НООСТРОЙ» по хоздоговорной теме №101-2017.

**Цель работы** – научное обоснование и разработка метода оперативного мониторинга процессов загрязнения и электрохимической очистки грунтов от нефтепродуктов при освоении недр для повышения экологической безопасности ведения горных работ, снижения материальных и трудовых затрат на природовосстановительные работы.

**Объект исследований:** грунтовые массивы, открытые и в основаниях горнотехнических сооружений (автозаправочных станций, складов ГСМ, электроподстанций, дамб отстойников и др.), загрязненные нефтепродуктами (горючим, машинными, трансформаторными, смазочными маслами).

**Предмет исследований:** физические процессы в грунтовом массиве при его очистке от загрязнений нефтепродуктами электрохимическим методом.

**Основная идея работы** состоит в использовании электрической контрастности нефтепродуктов как заполнителей порового пространства грунтов для диагностирования зон загрязнения и контроля процессов в зоне дезактивации при электрообработке.

**Основные задачи исследований:**

- обоснование и разработка метода электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами при ведении горнотранспортных работ;
- установление закономерностей изменений физических и электрических свойств грунтов в процессе их очистки от загрязнителей электрохимическим методом;
- разработка методик геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрообработки загрязненных грунтов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- для электрофизического контроля степени загрязнения грунтов целесо-

образно использовать зависимости удельного электросопротивления (УЭС) от пористости, влажности и гармонического средневзвешенного для двухкомпонентного заполнителя пор; при коэффициенте загрязнения  $k < 20\%$  параметр структуры порового пространства для условий Кузбасса принимают в диапазоне  $\beta = 1,3-2,2$  и корректируют по нелинейной зависимости от относительного УЭС, при этом автоматизация расчета  $k$  обеспечивается циклическими алгоритмами определения локальных значений с оптимизацией структурных параметров по минимальному отклонению расчетных от измеренных величин УЭС и интегральных значений с разбиением загрязненной зоны на элементы;

- изменение величины УЭС при контроле электрохимической обработки нефтезагрязненных грунтов происходит за счет электроосмотического переноса смеси «нефтепродукт-влажа-растворитель» в прикатодную область и электрокоагуляции нефтепродукта преимущественно в прианодной области с увеличением размеров частиц грунта, приводящей к снижению содержания фракций  $< 0,1$  мм до 1,7 раза, уменьшению влажности на 3–6% и плотности на 3–7%; оба процесса соответствуют снижению величины  $k$ ;

- экспресс-диагностирование зон нефтезагрязнений обеспечивается по положительным аномалиям на графиках электрических зондирований и профилирований, а мониторинг процессов очистки реализуется по относительному изменению эффективного УЭС обрабатываемой зоны, причем моменты корректирования режима определяют по стабилизации величины  $k$ .

**Методы научных исследований.** В работе использован комплекс методов, включающий:

- анализ и обобщение научно-технической информации в областях методов очистки природной среды от загрязнений и методов мониторинга процессов управления свойствами грунтов;
- аналитические методы физики горных пород и электроразведки;
- лабораторные и натурные экспериментальные исследования физических свойств грунтов методами инженерно-геологических изысканий и геофизики;
- методы регрессионного анализа и алгоритмизации при циклической обработке баз данных.

**Научная новизна работы** заключается:

- в обосновании метода определения содержания нефтепродукта в порах грунта по его электропроводящим свойствам;
- в разработке алгоритмов расчета локальных и интегральных коэффициентов загрязнения грунта нефтепродуктами;
- в установлении основных закономерностей изменений физических свойств нефтезагрязненных грунтов в процессе электрохимической обработки;
- в разработке методик диагностирования зон загрязнения нефтепродуктами на горнотехнических объектах различного типа геофизическими методами

и управления режимами электрообработки по данным мониторинга.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются:

- корректным применением апробированных зависимостей физики горных пород и электроразведки;
- применением в лабораторных и натурных исследованиях стандартной измерительной аппаратуры, прошедшей метрологическую проверку, и стандартных методов обработки экспериментальных данных.

**Личный вклад автора** заключается:

- в аналитическом обосновании метода контроля загрязнения нефтепродуктами по электрическим свойствам грунта;
- в разработке алгоритмов и компьютерных программ для обработки данных геофизического мониторинга;
- в проведении комплекса лабораторных и натурных экспериментальных исследований свойств загрязненных грунтов методами инженерно-геологических изысканий и геофизики, обработке и анализе их результатов;
- в разработке методик диагностирования зон нефтезагрязнений и управления режимом электрохимической обработки загрязненных грунтов на основе непрерывного мониторинга.

**Научное значение работы** заключается в расширении знаний о взаимосвязях между физико-механическими и электрическими свойствами горных пород при их загрязнении нефтепродуктами, а также о закономерностях гидродинамических и физико-химических процессов, протекающих в зоне электрообработки загрязненных грунтов.

**Отличие от ранее выполненных работ** заключается:

- в новом подходе к расчету УЭС трехфазной среды с учетом объемного соотношения компонентов заполнителя пор;
- в идеях циклического подбора структурных параметров и разбиения зоны загрязнения на элементы при расчетах локального и интегрального коэффициентов загрязнения;
- в установлении диапазонов изменения физико-механических и электрических параметров нефтезагрязненных грунтов и взаимосвязи между ними;
- в новых принципах геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрохимической очистки грунтов.

**Практическая ценность работы** состоит:

- в разработке методик и компьютерных программ для обработки результатов геофизических исследований зон нефтезагрязнений (свидетельства гос. регистрации №2015614431 и №2015614447);
- в разработке методик и рекомендаций по контролируемой очистке грунтов от нефтезагрязнений электрохимическим методом на горнотехнических

объектах различного типа при их эксплуатации и закрытии.

**Реализация работы.** Основные положения разработанных методик вошли составной частью в «Методические указания по геолого-геофизическому мониторингу процессов электрохимической очистки грунтовых оснований сооружений от загрязнений нефтепродуктами. – Кемерово. – 2017. – 30 с.», разработанные КузГТУ и ООО «НООЦЕНТР» и согласованные с НИИОСП им. Н. М. Герсевича и принятые к использованию ОАО «Кузбассгипрошахт» при разработке проектов предприятий горной отрасли.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы рассмотрены: на X международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2013); на научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия Молодая» (Кемерово, 2014, 2015, 2016, 2017); на международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (Кемерово, 2014, 2016); на Taishan Academie Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control «Mining 2014» (Qingdao China, 2014); на Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2015» (Новосибирск, 2015); на международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2016); на 8th Russian-Chinese Symposium «Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety» (Кемерово, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 7 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

**Объем работы.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, изложена на 127 страницах машинописного текста, включает 57 рис., 20 табл., список литературных источников из 118 наименований, 3 приложения.

Содержание диссертации соответствует п. 3.4 «Развитие опасных технико-природных процессов, методы и технические средства прогноза, оперативного обнаружения и устранения последствий чрезвычайных ситуаций при разработке природных и техногенных месторождений и переработке твердых полезных ископаемых» и п. 3.8 «Технические средства контроля и мониторинга состояния окружающей среды при освоении недр» паспорта специальности 25.00.36. – «Геоэкология (горно-перерабатывающая промышленность)».

Автор и научный руководитель выражают благодарность генеральному директору ООО «НООЦЕНТР» канд. техн. наук О. В. Герасимову за значительную материальную и организационную помощь в проведении лабораторных и натурных экспериментальных исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы очистки загрязненных грунтов на предприятиях горной отрасли.

Предприятия угольной промышленности Кузбасса дают более 90% от общего объема промышленных отходов. Источниками экологического загрязнения на угольных разрезах – филиалах «УК «Кузбассразрезуголь» являются склады горюче-смазочных материалов (ГСМ), котельные, обогатительные фабрики и комплексы, грунтовые фильтры, гидроотстойники, гидроотвалы и сухие отвалы. При больших объемах применения автомобильного и железнодорожного транспорта на жидком топливе, использования масел и смазочных материалов при эксплуатации горнодобывающего оборудования возрастают объемы отходов нефтепродуктов. Только на Кедровском угольном разрезе ежегодный объем подобных отходов составляет более 90 т, при этом регенерации подвергается не более 60% от этого объема. На плане горных работ зафиксировано 12 источников нефтезагрязнений (склады ГСМ, стационарные и передвижные АЗС с общей площадью до 10 тыс. м<sup>2</sup>). Проблема геоэкологического состояния угледобывающих регионов Кузбасса рассмотрена в публикациях О. В. Иванышиной, Н. В. Журавлевой, С. В. Овсянниковой, В. П. Потапова, В. П. Серединой, Е. А. Счастливецва, Л. С. Хорошиловой, А. Н. Шайхутдиновой и др.

Методы очистки грунтов от загрязнений по функциональным признакам разделяют на физические, химические, физико-химические и биологические. По механизму и принципу действия они предусматривают прямую очистку грунта от вредного компонента, подавление его активности реагентами или локализацию. В России наиболее целенаправленно исследования по развитию теории и практики очистки грунтов от загрязнений ведутся в МГУ под руководством профессора кафедры инженерной и экологической геологии В. А. Королева. Результаты деятельности этой научной школы изложены в работах Р. И. Злочевской, Д. В. Добровой, Е. Д. Лапшиной, М. А. Неврасовой, С. Л. Полищук, К. А. Ситар, Д. И. Хорошева и др. Данной проблеме посвящены также фундаментальные исследования В. Ж. Аренса, И. Б. Арчеговой, Л. Г. Ахмедзяновой, О. М. Гридина, В. А. Ефремовой, А. П. Журавлева, Н. Т. Кахраманова, Ю. В. Коржова, М. Ш. Махотловой, М. Н. Саксонова, А. З. Саушкина, В. В. Середина, И. В. Трусей, Р. Г. Шевцовой, Ю. В. Шувалова и др.

При обработке загрязненных малопроницаемых глинистых грунтов практически не имеет конкурентов электрохимический метод, основанный на совместном действии электрического тока и активного реагента. Теоретические основы электроосмотического водопонижения разработаны Г. М. Ломизе, А. В. Нетушила и развиты применительно к технологии закрепления грунтов в работах Б. П. Горбунова, П. Н. Должикова, Г. Н. Жинкина, В. Ф. Калганова, Э. Я. Кипко, Б. Ф. Рельтова, С. Г. Страданченко и др. Наиболее интенсивно исследования возможностей применения электрохимического метода для очистки



грунтов от нефтезагрязнений ведутся МГУ им. Ломоносова, а также отдельными фирмами Нидерландов и Италии.

Эффективное управление экологическим состоянием грунтовых массивов невозможно без оперативного мониторинга сложных физико-химических процессов, протекающих в зоне электрообработки. Поскольку нефтепродукты относятся к диэлектрикам и поэтому электрически контрастны, большую перспективу имеют методы мониторинга, основанные на электрическом зондировании и георадиолокации. Теория и практика этих методов базируются на фундаментальных положениях электроразведки, разработанных В. Н. Дахновым, М. С. Ждановым, В. Н. Кобрановой, Б. К. Матвеевым, Б. С. Световым, В. К. Хмелевским, Ю. В. Якубовским и др., и развиты при решении научно-практических задач в работах М. А. Власова, С. В. Дружинина, С. В. Изюмова, Е. В. Костюкова, Н. Ю. Никулина, В. В. Силиченко, Н. А. Смирнова, А. В. Старовойтова и др.

На основе критического анализа состояния проблемы геолого-геофизического мониторинга процессов электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений сформулированы цель и основные задачи исследований, изложенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** изложены обоснование и разработка метода электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами.

Для контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами целесообразно использовать зависимость удельного электросопротивления (УЭС) трехфазной среды от пористости, влажности и УЭС порового заполнителя, применяемую в электроразведке и включающую структурно-текстурные эмпирические параметры (В. Н. Дахнов, В. Н. Кобранова):

$$\rho_k = \frac{\alpha K_n}{m^{\beta} W^{\gamma}} \rho_v, \quad (1)$$

где  $m$  – пористость (поровая пустотность);  $W$  – коэффициент влагонасыщения пространства пор и трещин;  $\rho_v$  – УЭС раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м;  $K_n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – эмпирические параметры, зависящие от структурно-текстурных особенностей исследуемых грунтов;  $K_n$  – параметр, учитывающий поверхностную проводимость глинистого микрослоя на поверхности пор;  $\alpha$  – параметр, зависящий от типа геологического отложения;  $\beta$  – параметр, определяемый структурой порового пространства (в основном извилистостью каналов);  $\gamma$  – параметр, зависящий от смачиваемости раствором поверхности пор.

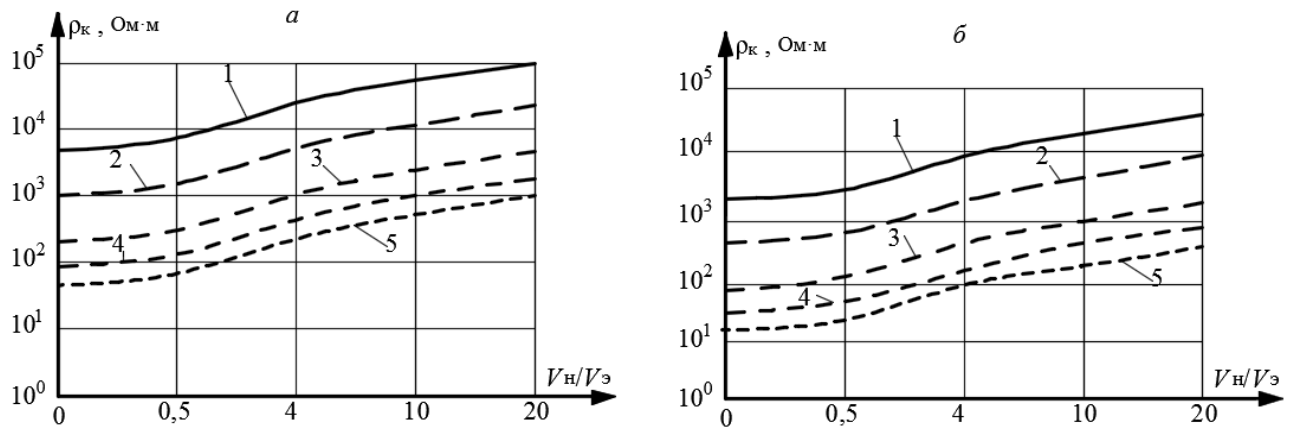
Диапазоны изменения параметров структуры порового пространства  $\beta = 1,3\text{--}2,2$  и смачиваемости  $\gamma = 1,8\text{--}3,3$  следует принимать для условий Кузбасса по результатам обратных расчетов на основе экспериментальных данных (М. В. Гуцал, Е. В. Костюков), а УЭС порового заполнителя рассчитывать по

формуле гармонического средневзвешенного для двухкомпонентной среды (В. В. Ржевский, Г. Я. Новик):

$$\rho_{\text{в}}^{-1} = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i^{-1} = V_{\text{э}} \rho_{\text{э}}^{-1} + V_{\text{н}} \rho_{\text{н}}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{н}}$ ,  $\rho_{\text{э}}$  – УЭС соответственно средневзвешенного, нефтепродукта и электролита, Ом·м;  $V_{\text{н}}$ ,  $V_{\text{э}}$  – относительный объем в растворе соответственно нефтепродукта и электролита.

Экспериментально установлено, что с изменением концентрации водного раствора соли до 6,5% величина УЭС уменьшается от 80 до 0,2 Ом·м, а УЭС моторных масел, бензина и растворителя в диапазоне частот  $f = 0-1$  кГц изменяется в диапазоне  $(0,2-1,1) \cdot 10^6$  Ом·м. С использованием экспериментальных и теоретических зависимостей получены расчетные базы данных УЭС заполнителя пор и эффективного УЭС трехкомпонентной среды для указанных диапазонов концентраций водных растворов, частот и соотношения объемных долей нефтепродукта и электролита  $V_{\text{н}}/V_{\text{э}} = 0-20$  (рис. 1).



**Рисунок 1** – Зависимости эффективного УЭС  $\rho_{\text{к}}$  супесей от коэффициента влагонасыщения пространства пор и трещин  $W$ , относительного содержания нефтепродукта  $V_{\text{н}}/V_{\text{э}}$  и концентрации соли в электролите  $C = 0,5$  г/л (а),  $C = 50$  г/л (б):

1 –  $W = 0,1$ ; 2 –  $W = 0,2$ ; 3 –  $W = 0,4$ ; 4 –  $W = 0,6$ ; 5 –  $W = 0,8$

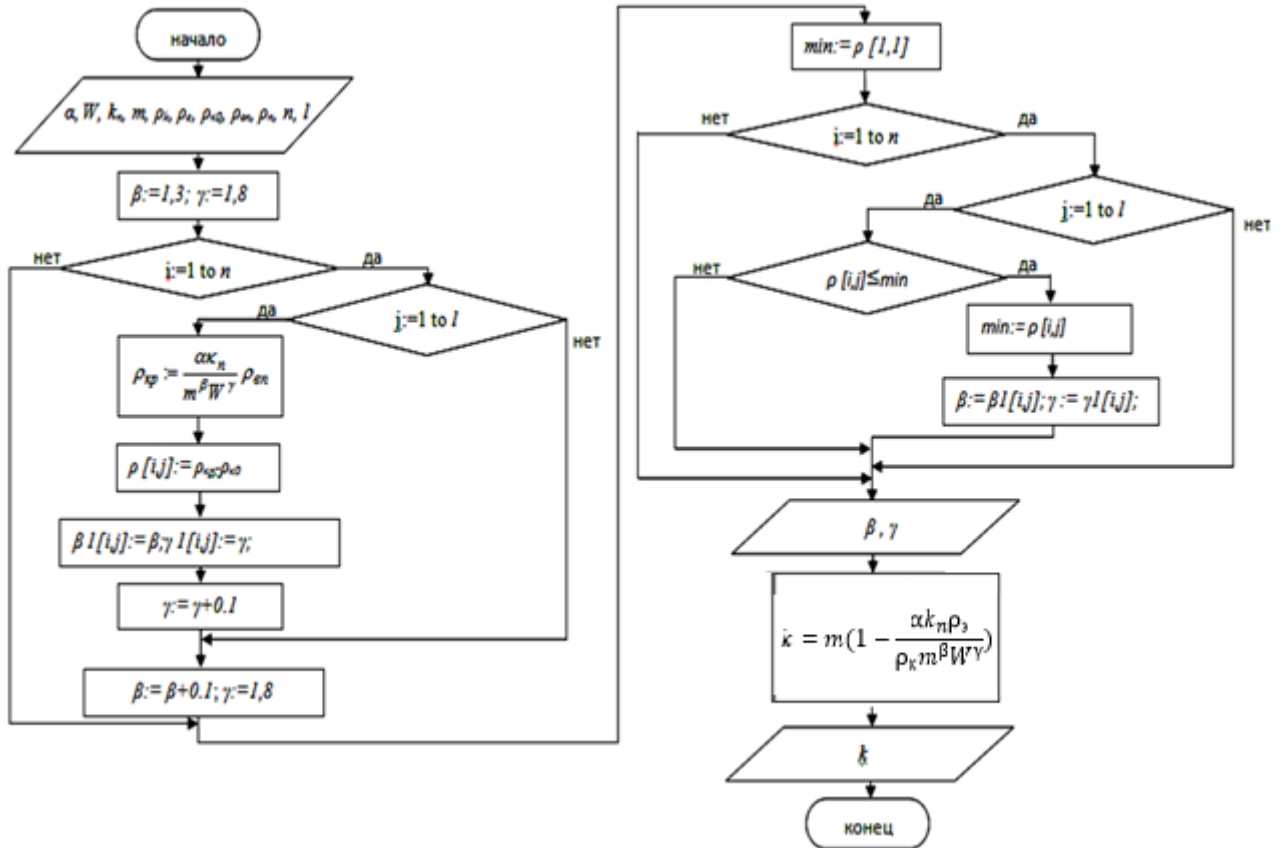
Для автоматизации расчета локального коэффициента загрязнения  $k$  грунта по экспериментальным данным электрических зондирований разработан алгоритм (рис. 2), включающий подбор оптимальных величин структурных параметров  $\beta$  и  $\gamma$  по критерию минимального отклонения расчетного значения эффективного УЭС от измеренного и расчет значений  $k$  по отношению значений эффективных УЭС в пределах зоны загрязнения и вне ее:

$$k = m V_{\text{н}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{н}}$  – объем заполнения пор нефтепродуктом;

$$V_H = \frac{\rho_H - \frac{\alpha k_n \rho_{\text{Э}} \rho_H}{\rho_K m^{\beta} W^{\gamma}}}{\rho_H - \rho_{\text{Э}}} \approx k = m \left( 1 - \frac{\alpha k_n \rho_{\text{Э}}}{\rho_K m^{\beta} W^{\gamma}} \right). \quad (4)$$

Алгоритмы реализованы в форме программных комплексов в среде Free Pascal (продукт Lazarus), прошедших государственную регистрацию.



**Рисунок 2** – Блок-схема расчета локального коэффициента загрязнения грунта нефтепродуктами:  $\rho_{\text{Э}}$ ,  $\rho_{\text{K0}}$ ,  $\rho_{\text{H}}$  – УЭС соответственно электролита, грунта вне загрязненной зоны, нефтепродукта, Ом·м;  $n$  и  $l$  – задаваемое количество циклов поиска оптимальных значений  $\beta$  и  $\gamma$ ;  $k$  – коэффициент загрязнения грунта

Для повышения точности оценки степени загрязнения предложены интегральные параметры  $I_s$  и  $I_v$ , включающие суммирование произведений локальных значений  $k$  и элементарных площадей  $S_i$  или объемов  $V_i$ , на которые зона загрязнения разбивается с заданным шагом с помощью специального алгоритма:

$$I_s = \frac{\sum k_i S_i}{S}, \quad I_v = \frac{\sum k_i V_i}{V}. \quad (5)$$

Для экспериментальной проверки точности расчетных зависимостей и компьютерной программы было проведено сопоставление коэффициентов загрязнения грунта, с которым был перемешан фиксированный объем отработанного масла, при известной влажности и пористости, показавшее, что в диапазоне  $k < 20\%$  погрешность оценки не превышала 23 %. При  $k > 30\%$  образец грунта переходил из связного состояния в пластичную несвязную суспензию, вследствие чего величина  $\rho_K$  и погрешность прогноза резко возросла (табл. 1).

Установлено также, что для повышения точности расчета следует корректировать величину структурного параметра  $\beta$  по установленной нелинейной зависимости при  $\rho_k/\rho_{\kappa} > 190$ .

**Таблица 1** – Физико-технические характеристики грунта в опытных образцах (масса грунта  $m_g = 200$  г, влажность  $W = 22$  %)

Характеристика	№ образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Масса масла, г	0	2	4	10	15	20	30	40	50	60
УЭС грунта, $\rho_k$ , Ом·м	13,75	17,5	21,25	23,75	22,5	25,0	26,25	42,5	950,0	1150,0
Пористость, $m$ , %	38,8	40,7	42,5	48,1	52,7	57,4	66,7	76,0	85,3	94,6
$k$ , %	0	1,0	1,8	4,35	6,4	8,3	12,0	15,4	18,5	21,4

Для экспресс-анализа при полевых исследованиях можно использовать регрессионные зависимости величин  $k$  от относительной величины  $\rho_k/\rho_{\kappa 0}$ , при этом корреляционное отношение  $R > 0,9$  имеют полиномиальная, степенная и линейная зависимости (табл. 2).

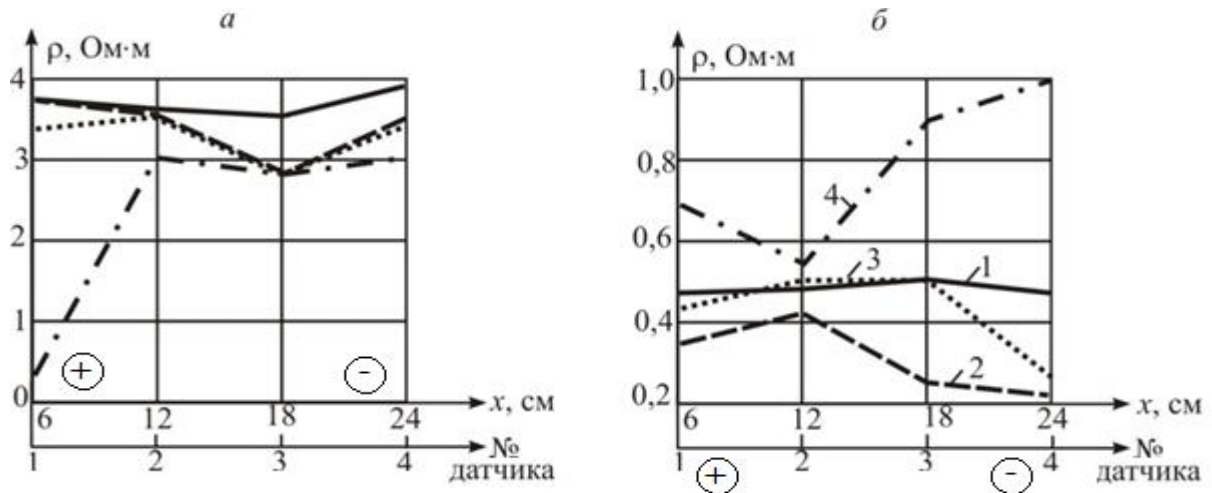
**Таблица 2** – Зависимость коэффициента загрязнения  $k$  от относительного изменения УЭС грунта в образце

Уравнение	$R$	$F_{кр}^*$	$F^*$
1. Линейная $k = 9,49 \frac{\rho_k}{\rho_{\kappa 0}} - 10,61$	0,900	7,709	17,356
2. Логарифмическая $k = 12,52 \ln(\frac{\rho_k}{\rho_{\kappa 0}}) - 1,19$	0,867	7,709	12,287
3. Полиномиальная $k = 18,57(\frac{\rho_k}{\rho_{\kappa 0}})^2 - 42,7257 \frac{\rho_k}{\rho_{\kappa 0}} + 24,44$	0,981	9,552	81,746
4. Степенная $k = 0,19(\frac{\rho_k}{\rho_{\kappa 0}})^{6,1022}$	0,977	7,709	93,087

\*  $F_{кр}$ ,  $F$  – соответственно, критическое и расчетное значения критериев Фишера.

В третьей главе изложены результаты исследований закономерностей изменения физических и электрических свойств грунтов в процессе очистки их от загрязнителей электрохимическим способом.

На одномерной физической модели цилиндрической формы с плоскими электродами при обработке в однородном электрическом поле подтверждено, что вследствие электрической контрастности водного раствора и нефтезагрязнителя применение микродатчиков УЭС позволяет контролировать перемещение жидкостей в зоне электрообработки. Установлено, что в чистом грунте перемещение природной влаги происходит в сторону анода, вызывая уменьшение уровня УЭС (рис. 3 а); при наличии в порах нефтепродукта он перемещается в направлении катода, при этом УЭС в точке замера возрастает (рис. 3 б).

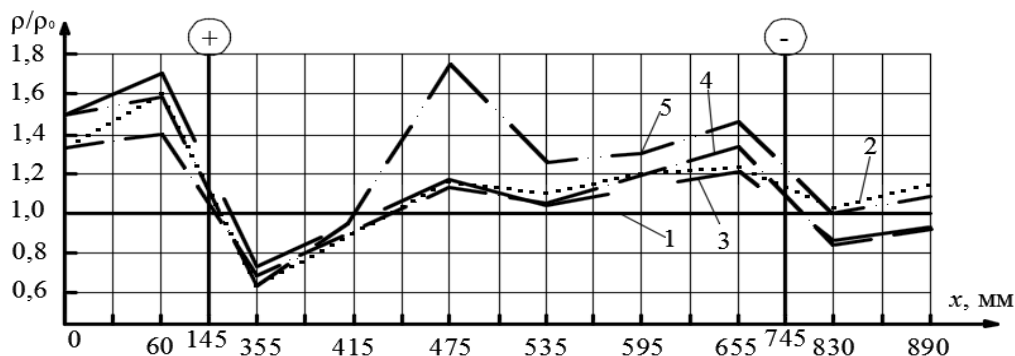


**Рисунок 3** – Изменение УЭС чистого грунта (а) и загрязненного маслом SHELL HELIX ULTRA (б) с добавлением раствора NaCl при электрохимической обработке:  
1 – начало обработки; 2 – через 1 сут; 3 – 2 сут; 4 – 6 сут

Указанные процессы происходят относительно монотонно, их интенсивность во времени зависит от вязкости загрязнителя (масло, мазут, дизельное топливо, бензин). При добавлении в один из электродов растворителя типа Гексан-Н происходит разбавление нефтепродукта, сопровождающееся скачкообразным изменением УЭС, при этом процессы осмотического движения жидкостей усиливаются. Кроме того зафиксирована общая тенденция к увеличению уровня УЭС, связанная с изменением структурно-текстурных параметров грунта при электрообработке.

Исследования образцов грунтов показали, что за счет термического воздействия электрического тока происходит связывание влаги, коагуляция нефтепродукта в порах с увеличением размеров твердых частиц грунта и их слипанием. В результате этих процессов зафиксировано снижение влажности и плотности грунта во всех точках модели, а также резкое снижение содержания фракций  $< 0,1$  мм и увеличение содержания более крупных фракций (0,1–2,0 мм) в гранулометрическом составе.

Более точное приближение к натурным условиям дает объемная модель при реальных размерах установки с двумя трубчатыми электродами-инъекторами с практически применяемыми диапазонами напряжения до 300 В и плотностью тока до  $15 \text{ А/м}^2$ . Объем модели составил  $0,15 \text{ м}^3$ . Направления перемещения порозаполняющих жидкостей в объеме при неоднородном электрическом поле сохраняются: водного раствора – к аноду, а нефтепродукта – к катоду (рис. 4), при этом вероятно волнообразное развитие процессов, т. к. вязкость нефтепродукта выше, чем у воды. В приэлектродных областях с наибольшей плотностью тока имеет место анизотропия УЭС на интервале радиальной координаты  $r \geq 90$  мм, которая при  $r = 150$  мм сглаживается, а при токорасходе  $I \cdot t > 50 \text{ А} \cdot \text{ч}$  вследствие термического высушивания и консолидации грунта величина УЭС возрастает.



**Рисунок 4** – Относительное изменение УЭС чистого грунта от координаты  $x$  по оси установки при электрообработке:

1 – начало обработки; 2 –  $I \cdot t = 3,6 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ; 3 –  $6 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ; 4 –  $13,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ; 5 –  $22,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$

Установлены количественные диапазоны изменения физико-механических свойств загрязненного грунта: влажность снижается на 15–20%, а плотность – на 2–10% как в сухом, так и во влажном состоянии. В результате коагуляции нефтепродукта на поверхности частиц породы и их слипания происходит уменьшение содержания фракций  $< 0,1 \text{ мм}$  в 2–5 раз и увеличение содержания фракций  $0,1 \text{ мм}$  на 30–63%. Особенно интенсивно процесс изменения гранулометрического состава грунта происходит в прианодной зоне (табл. 3, 4).

**Таблица 3** – Изменение физических параметров грунта в результате электрообработки

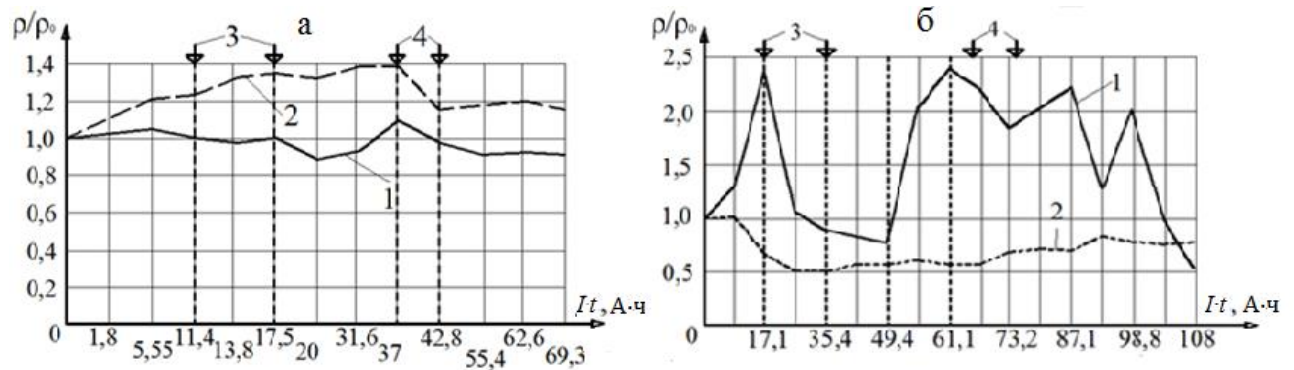
Номер ванны, расположение пробы	Загрязнитель	Характеристики (до/после обработки)		
		Влажность, %	Плотность во влажном состоянии, г/см <sup>3</sup>	Плотность в сухом состоянии, г/см <sup>3</sup>
№ 1 на +электроде	Отсутствует	35,3/28,1	2,38/2,22	1,76/1,73
№ 1 в центре		35,2/30,1	2,33/2,20	1,73/1,70
№ 1 на –электроде		35,2/29,6	2,14/2,01	1,58/1,55
№ 2 на +электроде	Отработанное масло	39,4/29,1	2,51/2,28	1,80/1,77
№ 2 в центре		39,4/31,3	2,48/2,23	1,78/1,75
№ 2 на –электроде		39,4/28,8	2,44/2,22	1,75/1,72

**Таблица 4** – Изменение гранулометрического состава грунта в результате электрообработки

Номер ванны, расположение пробы	Загрязнитель	Содержание фракций (мм), % (до/после обработки)				
		2	0,5	0,25	0,1	$< 0,1$
№ 1 на +электроде	Отсутствует	8,8/12,0	33,3/36,0	17,5/15,0	19,2/19,0	21,2/18,0
№ 1 в центре		8,8/9,8	33,3/34,1	17,5/16,2	19,2/23,0	21,2/16,9
№ 1 на –электроде		8,8/9,5	33,3/37,2	17,5/15,7	19,2/22,0	21,2/15,6
№ 2 на +электроде	Отработанное масло	8,8/6,1	33,3/41,8	17,5/15,8	19,2/31,2	21,2/5,1
№ 2 в центре		8,8/7,3	33,3/38,2	17,5/16,3	19,2/26,2	21,2/12,0
№ 2 на –электроде		8,8/8,6	33,3/43,7	17,5/14,5	19,2/24,8	21,2/8,4

Дополнительное введение в электроды-инъекторы активного вещества-растворителя Гексан-Н приводит к разжижению нефтепродукта и его перемешиванию в порах с естественной влагой, что нарушает монотонность процессов изменения УЭС в прикатодной области, где происходит дополнительное скопление жидкого нефтепродукта, и замедляет интенсивность уплотнения грунта в

прианодной области. Особенно резко это проявляется при грунтах, загрязненных более вязким отработанным маслом (рис. 5).

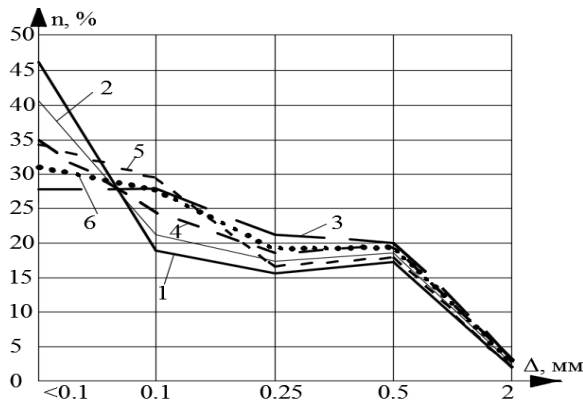


**Рисунок 5** – Изменение УЭС загрязненного дизельным топливом (а) и отработанным маслом (б) грунта с очисткой растворителем при электрохимической обработке: 1 – на датчике №1 около отрицательного электрода; 2 – на датчике №8 около положительного электрода; 3 – момент подачи растворителя в положительный электрод; 4 – момент подачи растворителя в отрицательный электрод

Проведенные после завершения обработки извлечение и визуальный осмотр грунта подтвердили результаты геологического и геофизического мониторинга: образование уплотненного грунта с характерным темным оттенком в прианодной области и рыхлого грунта естественного цвета с пятнами нефтепродукта в прикатодной.

Натурные исследования, проведенные на полигоне ООО «НООЦЕНТР», полностью соответствовали реальным схемам электрохимической обработки загрязненных грунтов по количеству электродов, глубине и интервалу их установки, токовому режиму и продолжительности обработки. Испытаны все ранее примененные в лабораторных условиях виды обработки и различные по вязкости виды загрязнителей. Дополнительно к ранее применявшимся методам инженерно-геологических изысканий и микродатчиков УЭС использовались интегральные геофизические методы электрического зондирования на постоянном токе и георадиолокации. Принципиальное отличие условий натурального эксперимента от лабораторного состояло в том, что опытный участок массива не изолирован от прилегающих грунтов и атмосферы.

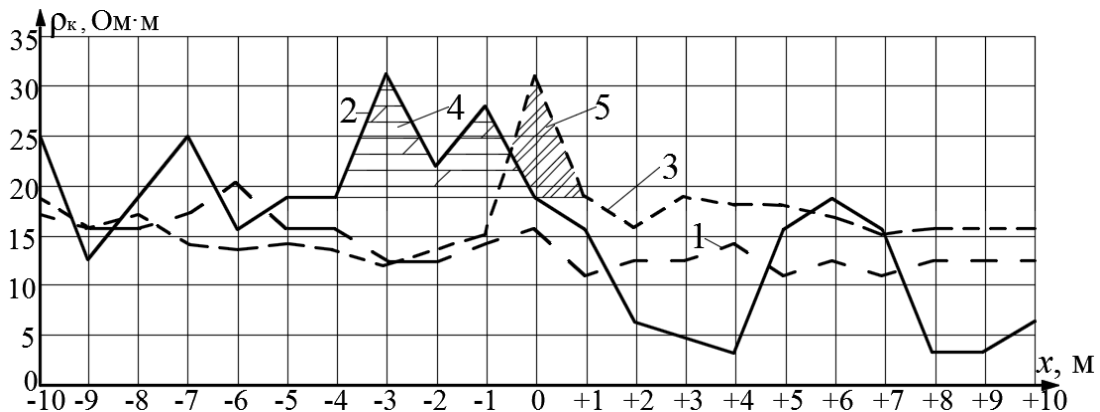
В целом результаты исследований образцов и измерений микродатчиками УЭС подтвердили результаты лабораторных экспериментов, характеризующие закономерности изменения физических свойств грунтов в прикатодной и прианодной областях, однако количественно диапазоны изменения свойств изменились, что связано с дополнительным поступлением влаги из прилегающих грунтов и атмосферы. Так, диапазон уменьшения влажности составил 3–6%, а плотности 3–7 %, содержание частиц с размером  $< 0,1$  мм уменьшилось в зависимости от вида загрязнителя от 1,15 до 1,61 раза (рис. 6). Визуально в результате вскрытия подтверждено формирование уплотненной прианодной зоны и скопления остаточного нефтепродукта.



**Рисунок 6** – Изменение состава грунта в зависимости от вида обработки:

1 – чистая глина до электрообработки; 2 – чистая глина после электрообработки; 3 – загрязнение отработанным маслом после электрообработки; 4 – загрязнение бензином после электрообработки; 5 – загрязнение отработанным маслом после электрообработки с растворителем; 6 – загрязнение бензином после электрообработки с растворителем

Георадиолокационное и электрическое зондирование проводили по одному продольному и трем поперечным профилям. На радарограммах загрязненные нефтепродуктами участки шириной 2–2,4 м и глубиной до 1,5–1,8 м характеризуются ослаблением горизонтальных линий синфазности. На графиках электропрофилирования (ЭП) и вертикального зондирования (ВЭЗ) данные зоны диагностируются по повышенным значениям эффективного УЭС  $\rho_k$ , при этом величины интегральных значений  $\rho_k$  до загрязнения, после загрязнения и после обработки составили: для схемы ЭП (рис. 7) соответственно 13,1; 21,2; 17,3 Ом·м; для схемы ВЭЗ – 14,1; 22,3; 16,7 Ом·м.

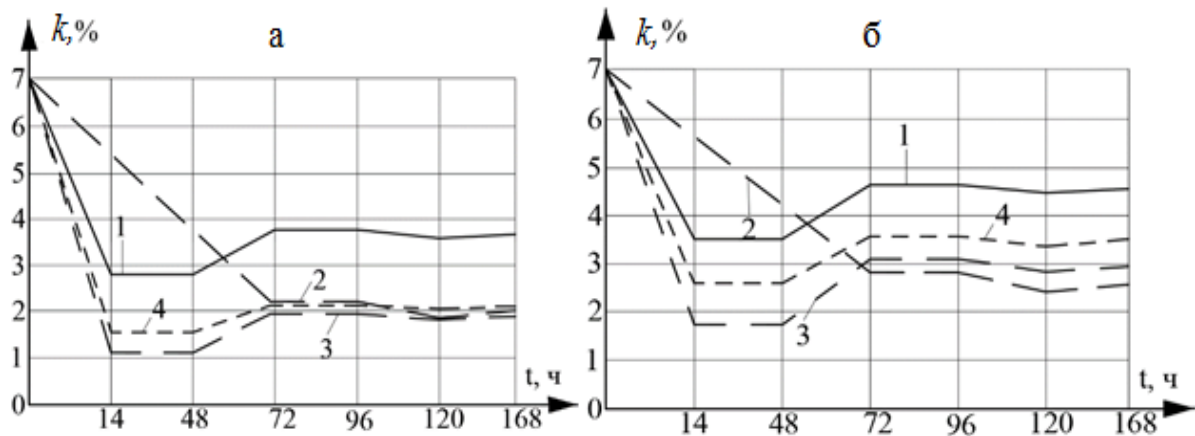


**Рисунок 7** – Результаты электропрофилирования по оси установки с шагом 1 м:

1 – до загрязнения; 2 – после загрязнения; 3 – после электрообработки; 4 – расположение аномальной зоны до обработки; 5 – расположение аномальной зоны после обработки

Позонный мониторинг изменений  $\rho_k$ , когда в качестве измерительных использовали электроды-инъекторы, показал, что на интервале времени обработки  $t = 48–72$  ч происходит монотонное снижение  $\rho_k$  в 2–5 раз при всех загрязнителях и схемах обработки, обусловленное миграцией и коагуляцией загрязнителя, увеличением пористости, поступлением влаги из прилегающих грунтов и атмосферы. С использованием ранее установленных регрессионных зависимостей получено, что расчетный коэффициент загрязнения в результате обработки уменьшается от известного начального значения  $k = 7\%$  до 2–3,6% при загрязнении отработанным маслом и до 2,6–4,5% – при загрязнении бензином (рис. 8).





**Рисунок 8** – Графики изменения концентрации отработанного масла (а) и бензина (б) при электрообработке в зависимости от времени  $t$ : 1 – линейная зависимость; 2 – логарифмическая зависимость; 3 – полиномиальная; 4 – степенная

**В четвертой главе** представлены результаты разработки методик геолого-геофизического мониторинга при управлении режимами электрообработки загрязненных грунтов.

Объекты – потенциальные источники нефтезагрязнений грунта по возможностям диагностирования зон загрязнения следует разделять на открытые (аварийные участки нефтепроводов и коммуникаций, передвижные АЗС, дамбы очистных сооружений, железнодорожные станции и участки пути), частично открытые (сооружения ремонтных баз, хранилища и склады ГСМ, котельные), закрытые (стационарные АЗС, трансформаторные подстанции, резервуары). Для каждого из видов объектов назначается специальная система профилей георадиолокационного и электрического зондирования, по результатам которых определяют опорные точки и строят объемную модель зоны нефтезагрязнения. Согласно предложенному алгоритму по величине интегрального показателя загрязнения  $k$  принимают решение о выемке грунта для дезактивации (для объектов открытого типа) или его электрохимической обработке без выемки (для объектов частично открытого или закрытого типа) (рис. 9).

Оперативный контроль процессов электрообработки грунтовых оснований объектов частично открытого и закрытого типа ведут по схеме интегрального электрического зондирования с использованием в качестве измерительных электродов-инъекторов; для конечных контрольных измерений используют полевую лабораторию для испытаний грунтов и аппаратуру инфракрасной спектрофотометрии.

Максимальное использование возможностей электросиловой установки обеспечивается регулированием режима обработки: увеличением напряжения обработки и увлажнением приэлектродных зон. При этом моменты регулировки или прекращения обработки определяют по стабилизации контролируемой величины эффективного УЭС зоны электрообработки (рис. 10). Для практической реализации алгоритма контролируемой электрохимической очистки от нефтезагрязнений

целесообразно использовать разработанную в КузГТУ мобильную установку, включающую тиристорный преобразователь и блок управления, обеспечивающий регулировку напряжения до 380 В при токовой нагрузке до 80 А.



Рисунок 9 – Алгоритм диагностирования зон нефтезагрязнений

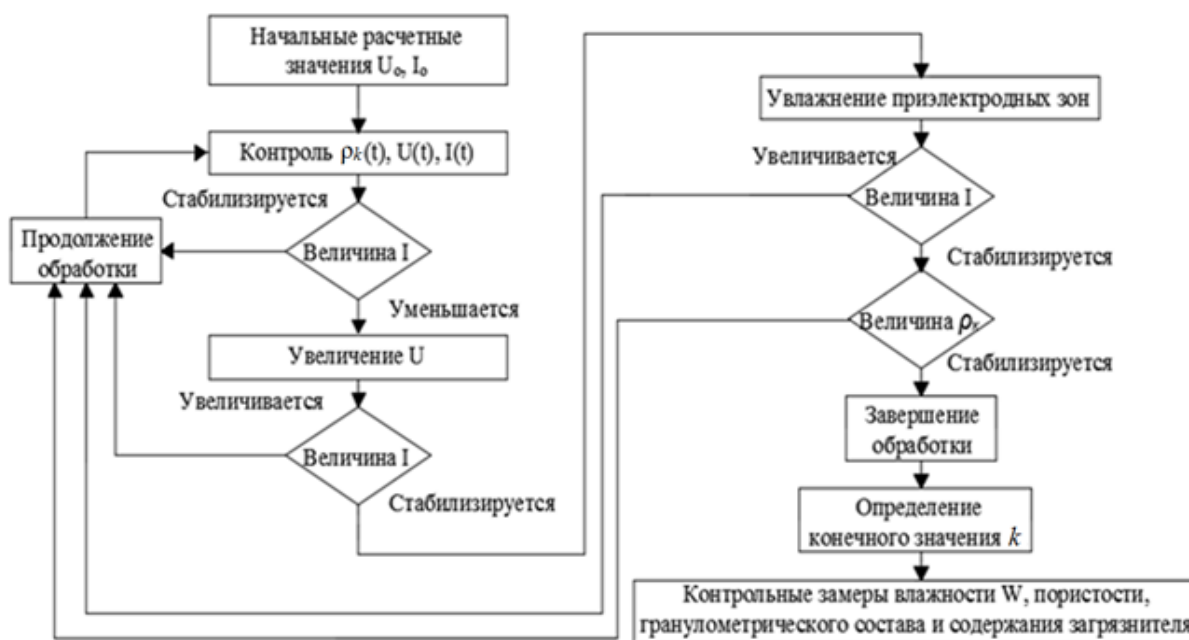


Рисунок 10 – Алгоритм контролируемой электрохимической очистки грунта от загрязнений нефтепродуктами:  $U$  – напряжение;  $I$  – сила тока

Технико-экономическая эффективность разработанного методического обеспечения технологии контролируемой электрохимической очистки грунтов от загрязнений нефтепродуктами обусловлена экономией трудозатрат и расхода электроэнергии не менее, чем на 20% за счет максимального использования возможностей силовой электроустановки и более точного определения момента окончания электрообработки. За счет снижения расхода электроэнергии при обработке грунтового массива объемом 200 м<sup>3</sup> экономия составит более 14,0 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача установления взаимосвязи электропроводности пористых влагонасыщенных грунтов с содержанием в них нефтепродуктов, обоснования и разработки на этой основе метода оперативного мониторинга степени загрязнения грунтов нефтепродуктами и их очистки, что имеет важное значение для оценки и обеспечения экологической безопасности природно-технических систем при освоении месторождений полезных ископаемых.

Основные научные и практические результаты исследований:

1. Физической основой способов электрофизического контроля степени загрязнения грунтов нефтепродуктами является зависимость удельного электрического сопротивления (УЭС) трехфазной среды от пористости, влажности и УЭС порового заполнителя, рассчитываемого по формуле гармонического средневзвешенного; при этом для условий Кузбасса диапазоны изменения параметров структуры порового пространства и смачиваемости составляют соответственно  $\beta = 1,3-2,2$  и  $\gamma = 1,8-3,3$ . На основе экспериментально установленных диапазонов изменения УЭС водного раствора ( $\rho_v = 0,2-80$  Ом·м) и основных видов нефтепродуктов (топливо, моторные масла) ( $\rho_n = (0,2-1,1) \cdot 10^6$  Ом·м) рассчитаны базы данных зависимости эффективного УЭС среды  $\rho_k$  от соотношения объемных долей нефтепродукта и влаги в диапазоне  $V_n/V_v = 0-20$ .

2. Для автоматизации расчета локального коэффициента загрязнения  $k$  разработан алгоритм, включающий подбор величин структурных параметров  $\beta$  и  $\gamma$ , обеспечивающих минимальное отклонение расчетных данных от измеренных, и определение  $k$  по соотношению эффективного УЭС  $\rho_k$  внутри аномальной зоны и за ее пределами  $\rho_{k0}$ . Повышение точности оценки степени загрязнения обеспечивается интегральными параметрами, включающими локальные значения  $k$  и соответствующие элементарные площади (объемы), на которые зона загрязнения разделяется с помощью циклического алгоритма. Для экспресс-прогноза целесообразно использовать регрессионные зависимости величины  $k$  от относительной величины  $\rho_k/\rho_{k0}$  при корреляционном отношении  $R > 0,9$ .

3. На одномерной и объемной физических моделях установлено, что при электрообработке зоны нефтезагрязнения водный раствор перемещается к аноду,

а нефтепродукт – к катоду; при этом интенсивность электроосмотического процесса зависит от вязкости загрязнителя и увеличивается с введением в электроды-инъекторы растворителя типа Гексан-Н. Термический эффект электрообработки заключается в коагуляции нефтепродукта в порах, увеличении размеров частиц и их слипании. При этом нефтепродукт переходит в связанное нерастворимое и менее токсичное состояние, влажность и плотность грунта уменьшаются, а в гранулометрическом составе резко снижается содержание фракции менее 0,1 мм и увеличивается содержание более крупных фракций.

При натурных испытаниях метода электрохимической обработки загрязненных грунтов на 9-электродной установке при увеличении напряжения до 300 В и плотности тока до 20 А/м<sup>2</sup> установлено существенное влияние вторичного увлажнения обрабатываемого грунта от прилегающих грунтов и атмосферы, что сужает диапазоны изменения физических свойств: влажность уменьшается на 3–6%, плотность – на 3–7%, содержание частиц фракции < 0,1 мм в зависимости от вида загрязнителя уменьшается в 1,15–1,74 раза, а фракций 0,1 мм – увеличивается в 1,17–1,61 раза. Наиболее интенсивно процессы коагуляции нефтепродукта происходят в прианодной области, а скопление водно-нефтяной смеси – в прикатодной.

4. Определение расположения и размеров (диагностирование) зоны нефтезагрязнения методом георадиолокации обеспечивается по ослаблению горизонтальных линий синфазности на радарограммах и методом электрического зондирования по положительным аномалиям на графиках вертикального зондирования и профилирования. Результатом диагностирования с помощью системы продольных и поперечных профилей является объемная модель зоны загрязнения. Экспресс-контроль изменения коэффициента загрязнения  $k$  в процессе электрообработки грунта обеспечивается по величине эффективного УЭС  $\rho_k$  при схеме позонного интегрального зондирования с использованием в качестве измерительных электродов-инъекторов. При опытных испытаниях после обработки в течение 168 ч величина  $k$  при загрязнении отработанным маслом снизилась с 7 до 2,11%, а при загрязнении бензином – до 3,49% (для экспоненциальной зависимости).

5. По возможности диагностирования зон загрязнения объекты различают на открытые, частично открытые и закрытые. Для объектов каждого типа по результатам радиолокационного или электрического зондирования строят модель зоны загрязнения, по величине интегрального показателя  $k$  принимают решение о выемке грунта (объекты открытого типа) или его электрохимической обработке (объекты частично открытого или закрытого типа). Максимальное использование возможностей электросиловой установки обеспечивается увеличением напряжения обработки и увлажнением приэлектродных зон, при этом моменты регулировки режима или прекращения обработки определяют по стабилизации величины  $k$ .

Использование разработок позволит повысить экологическую безопасность горных работ, а также снизить трудозатраты и расход электроэнергии за счет рационального режима электрообработки. Для объекта объемом 200 м<sup>3</sup> экономия за-

трат на электроэнергию составит более 14,0 тыс. руб.

**Основное содержание диссертации опубликовано  
в изданиях, рекомендованных ВАК России**

1. Шабанов, Е. А. Исследование физических свойств грунтов при электроосмотической обработке / Е. А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №1(107). – С. 3–7.

2. Шабанов, Е. А. Метод оценки загрязнения нефтепродуктами по электрическим свойствам грунтов / Е. А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №6(112). – С. 38–44.

3. Шабанов, Е. А. Электрофизический мониторинг процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений на лабораторных установках / Е. А. Шабанов, С. М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №1(119). – С. 3–14.

4. Шабанов, Е. А. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч. I. Изменение физических свойств грунтового массива / Е. А. Шабанов, С. М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №6(118). – С. 35–43.

5. Шабанов, Е. А. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч. II. Электрофизический контроль / Е. А. Шабанов, С. М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №6(118). – С. 44–50.

6. Шабанов, Е. А. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч. III. Электрофизический мониторинг зоны загрязнения / Е. А. Шабанов, С. М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №3(121). – С. 80–86.

7. Шабанов, Е. А. Исследование процессов электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений с использованием активного реагента / Е. А. Шабанов, С. М. Простов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №2(120). – С. 20–27.

в прочих изданиях

8. Шабанов, Е. А. Перспектива применения технологии электрохимической очистки загрязненных грунтов в Кузбассе / Е. А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы X Международной научно-практической конференции. – 2013. – Кемерово. – С. 390–393.

9. Шабанов, Е. А. К вопросу очистки грунтов от экотоксикантов электрохимическим методом / Е.А. Шабанов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // Природные ресурсы Сибири и дальнего востока – взгляд в будущее: материалы международного экологического форума. – 2013. – Кемерово. – С. 170–176.

10. Шабанов, Е. А. Физическое моделирование процессов электроосмотической обработки грунтов на одномерной модели / Е.А. Шабанов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // Эколог – профессия будущего: материалы Молодежного научного семинара. – 2014. – Кемерово. – С. 40–45.

11. Prostov, S. M. Physical basis of the controlled electrochemical cleaning from petroleum / S. M. Prostov, M. V. Gucal, E. A. Shabanov // Proceedings of the Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control / Atlantis Press. – 2014. – P.433–441.

Статья индексируется в SCOPUS.

12. Шабанов, Е. А. Экспериментальное исследование физических свойств грунтов при электроосмотической очистке от нефтепродуктов / Е.А. Шабанов, С. М. Простов // Горняцкая смена – 2015: сборник трудов Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы. – 2015. – Новосибирск. – С. 155–162.

13. Шабанов, Е. А. Исследование процессов электроосмотической очистки грунтов от нефтезагрязнений на объемной физической модели / Е. А. Шабанов // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: СибГИУ. – Новокузнецк. – 2016. – №2. – С. 434-440.

14. Evgeniy Shabanov, Sergey Prostov. Electrophysical Monitoring of the Processes of Electroosmotic Treatment of Soil from Oil Pollution on Laboratory Installations. Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium «Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety». Advances in Engineering Research. September (2016). Volume 92. P. 175–183.

Статья индексируется в SCOPUS.

15. Свидетельство №2015614431 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета интегрального показателя загрязнения грунта экотоксикантом» / Е. А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал; заявл. 2.03.2015; №2015611237; зарегистр. 17.04.2015.

16. Свидетельство №2015614447 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчета концентрации нефтепродукта в составе раствора, заполняющего поровое пространство грунта» / Е. А. Шабанов, С. М. Простов, М. В. Гуцал; заявл. 2.03.2015; №2015611182; зарегистр. 17.04.2015.

Подписано в печать 23.03.2018. Формат 60х84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ №\_\_

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский Центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.