

**ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР
MINING AND OIL AND GAS FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS,
SURVEYING AND GEOMETRY OF THE SUBSURFACE**

Научная статья

УДК 504.064:550.837.3:550.84.02

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-65-74

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРООБРАБОТКЕ
ГРУНТОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТРАСТНЫМИ
ТОКСИКАНТАМИ**

**Простов Сергей Михайлович, Шабанов Евгений Анатольевич,
Бушуев Александр Александрович**

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: bushuevaa@kuzstu.ru

Аннотация.

Загрязнение грунтов экотоксикантами (органическими, неорганическими, биоорганическими, радиоактивными) представляет собой очень серьезную экологическую проблему. Целью работы является установление закономерностей пространственно-временных изменений физических свойств песчано-глинистых грунтов, загрязненных высокоомными (нефтепродуктами) или низкоомными (растворами неорганических веществ) экотоксикантами, и взаимосвязей между ними в процессе электрообработки. На лабораторной модели двухэлектродной установки с реальными физическими и технологическими параметрами установлено, что при обработке токами высокой плотности формируются три характерных зоны примерно одинаковой ширины: анодная, из которой под действием электрического поля происходит поступательное электроосмотическое перемещение (отток) природной жидкости и захватываемых ею частиц органического токсиканта в сторону катода; катодная, в которой скапливаются перемещенные жидкости с измененными в процессе перемещения свойствами; центральная (переходная), в которой происходит постепенное изменение свойств жидкостей. При обработке грунтов, загрязненных нефтепродуктами, наиболее значимыми для дезактивации являются: электроосмотическое перемещение флюида «природная жидкость-токсикант» от анода к катоду с возможностью последующего механического удаления; переход за счет термического воздействия нефтепродукта из жидкого состояния в твердое, менее экологически опасное. Интенсивность обоих процессов взаимосвязана с границами и амплитудой положительных аномалий удельного электросопротивления (УЭС), что позволяет вести непрерывный геофизический мониторинг процессов. Контроль процессов дезактивации грунтов, загрязненных неорганическими кислотами (щелочами), включающих электролиз, испарение влаги и электроосмотическое перемещение токсиканта, обеспечивается по изменениям УЭС в приэлектродных и центральной зонах.

Информация о статье

Поступила:

01 апреля 2025 г.

**Одобрена после
рецензирования:**

15 ноября 2025 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2025 г.

Опубликована:

22 декабря 2025 г.

Ключевые слова:

**Нефтепродукт,
неорганический загрязнитель,
удельное
электросопротивление,
влажность, плотность,
гранулометрический состав**



Для цитирования: Простов С.М., Шабанов Е.А., Бушуев А.А. Моделирование физических процессов при электрообработке грунтов, загрязненных электрически контрастными токсикантами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 65-74. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-65-74, EDN: HOMXZCZ

Введение

Загрязнение грунтов экотоксикантами (органическими, неорганическими, биоорганическими, радиоактивными) представляет собой очень серьезную экологическую проблему. После выявления зон загрязнения, детализации их параметров (геометрических характеристик, химического состава, физического состояния и др.) возникает задача устранения вредного влияния загрязнителя, то есть очистки грунтов.

Принципиально различают три метода очистки грунтов [1-3]:

- радикальный, включающий удаление грунта из места его залегания, транспортировку на специальный полигон и обработку (утилизацию) с помощью специальных технологий;
- подавление вредного влияния экотоксиканта в месте его залегания путем

изменения его структуры, агрегатного состояния, химического состава и др.;

– изоляция (консервация) загрязненной зоны путем возведения изолирующих ограждений, экранов.

Методы удаления и изоляции зон загрязнения весьма трудоемки и успешно реализуются только на открытых объектах, допускающих работу мощной строительной техники. Однако существуют объекты, где применение данных методов весьма затруднительно или в принципе невозможно: загрязненные основания зданий и сооружений.

По механизму воздействия на загрязнитель, обеспечивающего его нейтрализацию (деструкцию), различают следующие методы:

- физический (гидро-, газодинамический, термический, электромагнитный);
- физико-химический (испарение,

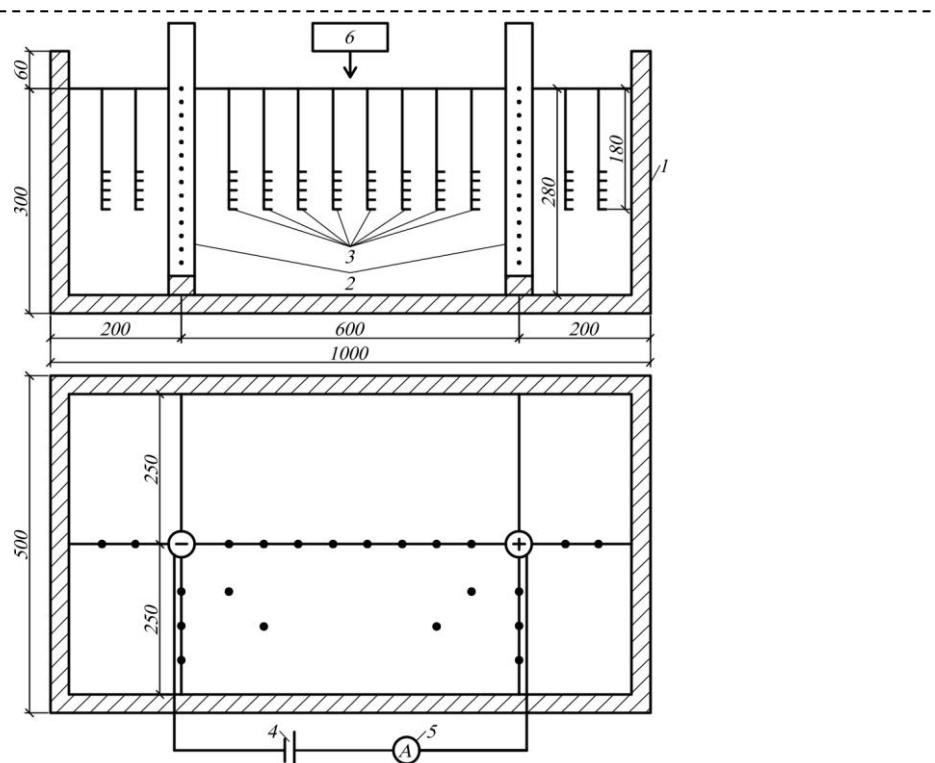


Рис. 1. Общий вид объемной модели электрообработки загрязненного грунта:

- 1 – емкость из непроводящего материала (текстолита), герметизированная пленкой;
 - 2 – электроды-инъекторы (перфорированные трубы, $d = 60 \text{ мм}$); 3 – четырехэлектродные микрозонды AMNB ($AM = MN = NB = 1 \text{ см}$); 4 – источник постоянного напряжения $2 \times B5-50$;
 - 5 – амперметр-мультиметр VA51A; 6 – компьютеризированный прибор «Электротест-2Рm/bt»
- Fig. 1. General view of the volumetric model of electrical treatment of contaminated soil: 1 – a container made of non-conductive material (textolite), sealed with a film; 2 – injector electrodes (perforated pipes, $d = 60 \text{ mm}$); 3 – four-electrode microprobes AMNB ($AM = MN = NB = 1 \text{ cm}$); 4 – a source of constant voltage $2 \times B5-50$; 5 – ammeter-multimeter VA51A; 6 – a computerized device «Elektrotest-2Pm/bt»

растворение, сорбция);

- химический (гидролиз, химическая нейтрализация, окисление);
- биологический (биоразложение, биодеградация).

В большинстве случаев загрязнение происходит в глинистых грунтах (глинах, суглинках, супесях), имеющих низкую проницаемость. Нагнетание под давлением активного нейтрализующего раствора в такие грунты весьма неэффективно. В подобных условиях достаточно перспективно применение метода электрообработки, обеспечивающего комплексное воздействие на массив с использованием эффектов электроосмоса, электрофореза, электролиза и термического преобразования.

Идея использования электрической (электроосмотической, электрохимической) обработки малопроницаемых грунтов (с коэффициентом фильтрации менее 10^{-7} м/с) для управления их свойствами нашла практическое применение с середины прошлого века для решения задач мелиорации и строительства, связанных с осушением и уплотнением (укреплением) грунтов в основаниях сооружений [4-7].

Перспективность применения электрообработки для решения экологических задач базируется на положительных результатах фундаментальных теоретических исследований в областях электроповерхностных и электрокинетических явлений в глинистых грунтах, полученных в МГУ [8-10 и др.], а также зарубежными учеными [11-14].

Одним из факторов, сдерживающих активное применение электрообработки грунтов, является недостаточное развитие методов неразрушающего непрерывного мониторинга процессов в зоне обработки, в том числе с использованием геофизических методов. Идея применения контролируемой электрообработки для очистки загрязненных грунтов развивается в КузГТУ, причем основным контролируемым параметром является электропроводность грунтов.

Целью данной работы является установление закономерностей пространственно-временных изменений физических свойств песчано-глинистых грунтов, загрязненных высокоомными (нефтепродуктами) или низкоомными (растворами неорганических веществ) экотоксикантами, и взаимосвязей между ними в процессе электрообработки токами высокой плотности.

Результаты ранее проведенных лабораторных исследований на образцах грунтов, искусственно дозированно загрязненных растворами кислот (щелочей) и нефтепродуктами, доказали принципиальную возможность контроля в

реальном масштабе времени степени загрязнения по изменениям их удельного электросопротивления (УЭС). Это позволяет не только диагностировать загрязненные зоны, но и проводить непрерывный мониторинг процессов восстановления грунтов в месте их загрязнения. Электрообработка грунтов токами высокой плотности в производственных условиях сопряжена с целым рядом технических трудностей, поэтому данная идея была реализована в лабораторных условиях на объемных физических моделях.

Физическое моделирование предусматривает выполнение критериев подобия. В данном случае актуальны критерии, предложенные в работах Г. М. Ломизе, А. В. Нетушила [4], Э. Я. Кипко, Ю. А. Полозова, С. Г. Странченко, П. Н. Должикова, А. А. Шубина [5] для моделирования процессов электроосмоса:

$$\text{– электродинамический} \quad \frac{j_h \rho_h}{E_h} = \frac{j_m \rho_m}{E_m}; \quad (1)$$

$$\text{– электрогидродинамический} \quad \frac{j_h^2 \rho_h t_h^3}{\gamma_h k_{pr,h}} = \frac{j_m^2 \rho_m t_m^3}{\gamma_m k_{pr,m}}, \quad (2)$$

где j – плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$; ρ – УЭС породы, $\text{Ом}\cdot\text{м}$; E – напряженность электрического поля, $\text{В}/\text{м}$; γ – удельный вес раствора, $\text{Н}/\text{м}^3$; t – длительность электрообработки, с; k_{pr} – коэффициент проницаемости породы, м^2 ; « h » и « m » – индексы, соответствующие натуре и модели.

Методика проведения исследования

При произвольных геометрических параметрах и физических свойствах материала модели удовлетворить критериям (1) и (2) практически невозможно. Поэтому целесообразно применить физические параметры модели, полностью совпадающие с параметрами натуры:

– обрабатываемая среда – суглины, смешанный миксером с загрязнителем (нефтепродуктом, раствором кислоты или щелочи) и уплотненный;

– диаметры электродов-инъекторов и расстояние между ними соответствовали размерам реальной установки электрообработки;

– концентрации загрязняющих жидкостей не отличались от тех, которые зафиксированы в производственных условиях;

– силовые параметры электропитающей установки составляли – максимальное напряжение $U_{max} = 300$ В, максимальный ток $I_{max} = 0,6$ А, что обеспечивало реальные параметры электрообработки $E_{m,max} = 500$ В/м, $j_{m,max} = 23$ $\text{А}/\text{м}^2$.

Таким образом, модель представляла собой простейшую двухэлектродную установку электрообработки с полностью натуральными параметрами (Рис. 1).

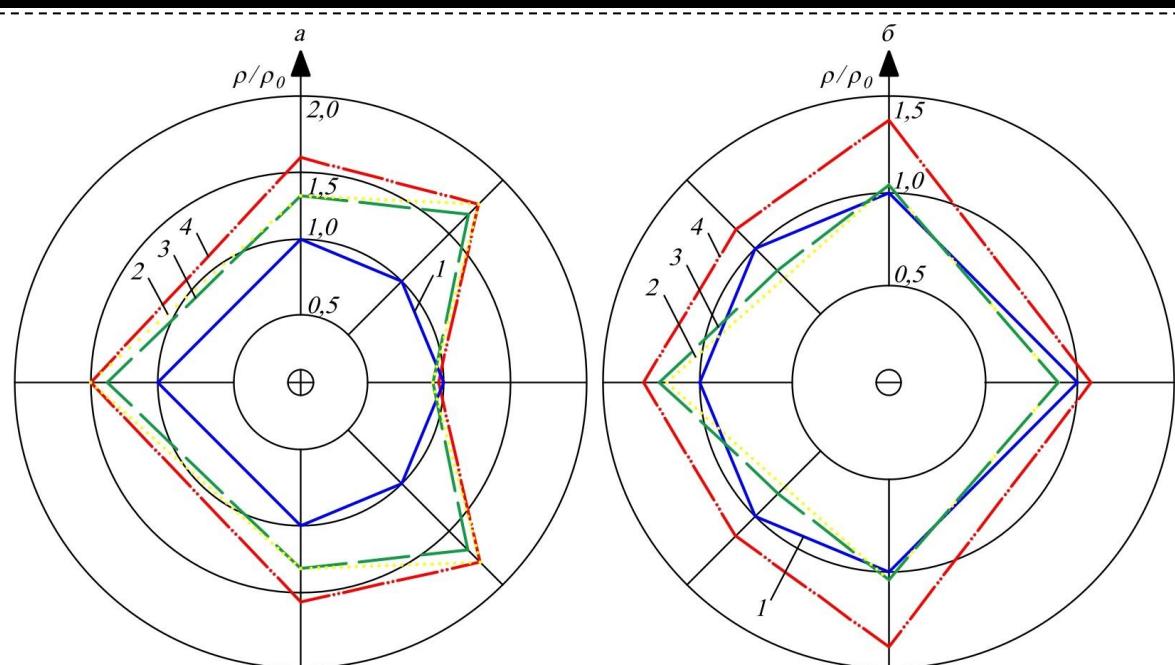


Рис. 2. Изменение относительной величины ρ/ρ_0 в приэлектродных пространствах анода (а) и катода (б) на расстоянии $r = 15$ см при обработке чистого грунта при различных значениях токоприхода $I\cdot t$: 1 – $I\cdot t = 0$; 2 – 21 А·ч; 3 – 30 А·ч; 4 – 65 А·ч

Fig. 2. Change in the relative value of ρ/ρ_0 in the near-electrode spaces of the anode (a) and cathode (b) at a distance of $r = 15$ cm when processing clean soil at different values of current input $I\cdot t$: 1 – $I\cdot t = 0$; 2 – 21 A·h; 3 – 30 A·h; 4 – 65 A·h

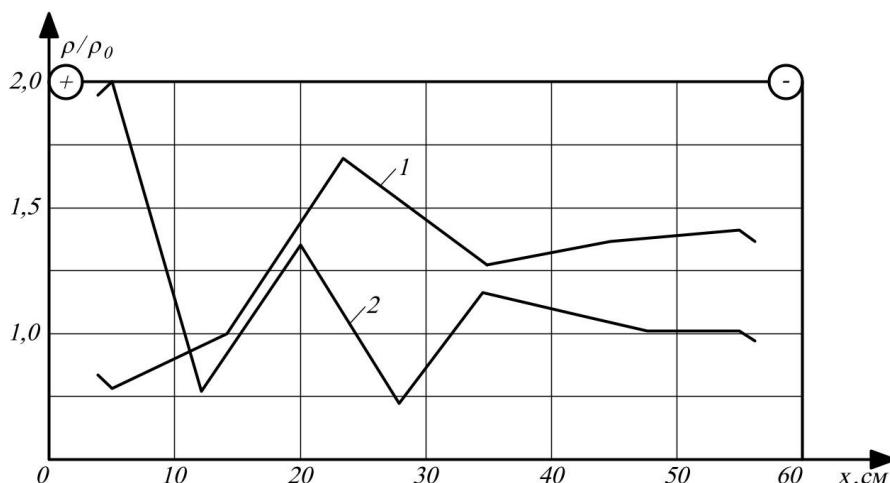


Рис. 3. График распределения ρ/ρ_0 в межэлектродном пространстве: 1 – чистый грунт при токоприходе $I\cdot t = 25,5$ А·ч; 2 – нефтезагрязненный грунт при $I\cdot t = 65,1$ А·ч

Fig. 3. Distribution graph of ρ/ρ_0 in the interelectrode space: 1 – clean soil at current inflow $I\cdot t = 25.5$ A·h; 2 – oil-contaminated soil at $I\cdot t = 65.1$ A·h

Ввиду малых размеров микропроводников измеренная величина фактически соответствовала истинному значению УЭС грунта. В опытах было задействовано 20-24 микропроводников, установленных на глубине 18 см, что позволило с достаточной детальностью исследовать изменения состояния и свойств грунтов модели в реальном масштабе времени.

Массы материалов модели следующие:

- грунт (суглинок) – 250-260 кг;
- вода водопроводная – 47-52 кг;

– нефтезагрязнитель (отработанное масло сорта Shell Helix-Ultra) – 8,1 кг;

– неорганический загрязнитель (1-2%-ный раствор H_2SO_4) – 6,0 кг.

Результаты и обсуждение исследования

Ниже приведены наиболее существенные результаты, полученные в ходе двух этапов исследований.

На первом этапе в качестве искусственного загрязнителя было использовано отработанное автомобильное масло, отличающиеся аномально высокими значениями УЭС [15].

Таблица 1. Отношения конечных физических параметров к значениям до обработки
Table 1. Ratios of final physical parameters to values before processing

Зона модели	Влажность	Плотность в естественном состоянии	Плотность в высушенном состоянии
Чистый грунт			
Анодная	0,796	0,933	0,983
Центральная	0,855	0,944	0,977
Катодная	0,841	0,939	0,981
Грунт, загрязненный нефтепродуктом			
Анодная	0,739	0,908	0,978
Центральная	0,794	0,899	0,978
Катодная	0,731	0,910	0,983

Таблица 2. Отношения конечных значений содержания фракций грунта к начальным
Table 2. Ratios of final values of soil fraction content to initial values

Зона модели	Фракция, мм				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Чистый грунт					
Анодная	1,264	1,081	0,857	0,989	0,849
Центральная	1,114	1,024	0,926	1,179	0,797
Катодная	1,079	1,117	0,897	1,146	0,736
Грунт, загрязненный нефтепродуктом					
Анодная	0,920	1,255	0,903	1,625	0,241
Центральная	0,829	1,147	0,913	1,364	0,566
Катодная	0,977	1,312	0,829	1,292	0,396

Схема расположения микрозондов (Рис. 1) включала датчики, расположенные радиально от оси электродов-инъекторов и по основной оси в межэлектродном пространстве. Анализ круговых диаграмм УЭС, полученных при обработке чистого (без загрязнителя) грунта (Рис. 2), показал, что физические процессы в приэлектродном пространстве анода и катода весьма неравномерны вследствие предельной искаженности силовых линий электрического поля.

Наибольший интерес представляют результаты измерений, полученные по основной оси установки «катод-анод», где электрическое поле близко к однородному (силовые линии напряженности Е параллельны). На Рис. 3 представлены графики относительного УЭС ρ/ρ_0 после окончания электрообработки чистого и загрязненного нефтепродуктом грунта.

Из приведенных графиков следует, что в исследуемом участке массива в процессе электрообработки обоих грунтов формируется три характерных зоны примерно одинаковой ширины:

- анодная, из которой под действием электрического поля происходит поступательное электроосмотическое перемещение (отток) природной жидкости и захватываемых ею частиц органического токсиканта в сторону катода;

- катодная, в которой скапливаются перемещенные жидкости с измененными в процессе перемещения свойствами;

– центральная (переходная), в которой происходит постепенное изменение свойств жидкостей.

В центральной зоне модели с чистым грунтом указанные выше процессы происходят относительно монотонно, а при наличии в жидкости нефтяных включений зафиксированы волнообразные изменения УЭС, которые связаны с тем, что нефтепродукты имеют вязкость значительно выше, чем у природной жидкости (водного раствора). Неоднородность УЭС в этой зоне связана с преобладанием в поровом заполнителе высоко- или низкопроводящего компонента.

Для детализации физико-химических процессов в пределах выявленных зон были отобраны образцы грунтов и проведены исследования комплекса их физико-механических параметров: влажности, плотности, гранулометрического состава. В Таблицах 1, 2 представлены полученные базы данных в форме отношений конечных значений параметров (после окончания обработки) к начальным.

Полученные результаты свидетельствуют о сложном комплексе гидродинамических и физико-химических процессов в зоне электрообработки.

Из данных Таблицы 1 следует, что во всем объеме исследуемой зоны происходит выпаривание влаги с уменьшением влажности на 15-20%, особенно в приэлектродных областях, где плотность тока j наибольшая и температура грунта повышается до 40-50 °C. Как в чистом,

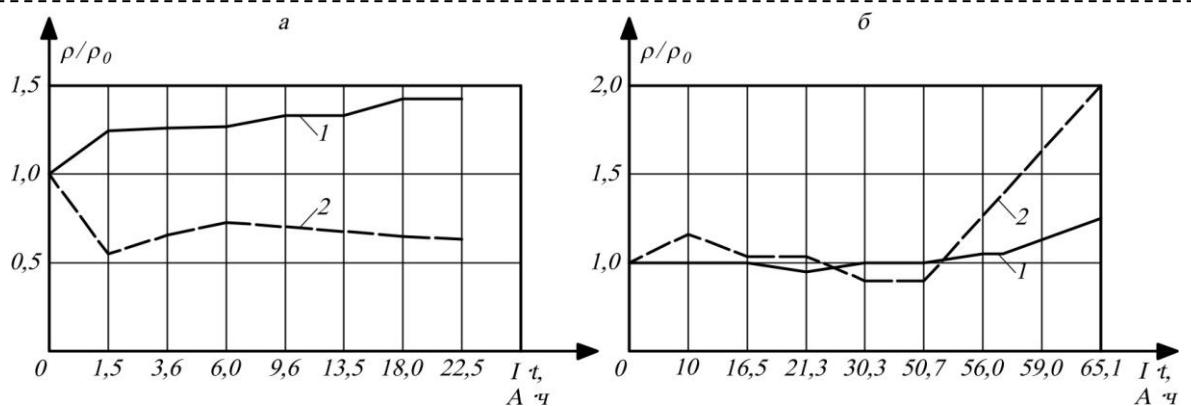


Рис. 4. Динамика относительного УЭС грунта, чистого (а) и нефтезагрязненного (б) в зависимости от токорасхода $I \cdot t$: 1 – катодная зона; 2 – анодная зона

Fig. 4. Dynamics of relative resistivity of soil, clean (a) and oil-contaminated (b) depending on current consumption $I \cdot t$: 1 – cathode zone; 2 – anode zone

так и в загрязненном грунтах во всех зонах происходит незначительное снижение плотности грунта (на 5-10% в естественном и на 1,5-2% в загрязненном состояниях).

Значительно более существенные изменения установлены в гранулометрическом составе загрязненного грунта. Это относится к наиболее мелкой фракции $< 0,1$ мм. Если у чистого грунта уменьшение доли этой фракции не превышало 15-25%, то у грунта, загрязненного нефтепродуктом, оно составило: в центральной зоне почти в 2 раза, а в приэлектродных – 2,5-4 раза. При этом существенно увеличивалась доля фракций в диапазоне 0,1-0,5 мм. В результате термического воздействия на нефтепродукт (машинное масло) происходит изменение его агрегатного состояния (твердение), наиболее мелкие частицы грунта, соединяясь, переходят в более крупную фракцию.

Из графиков изменения относительного УЭС во времени в приэлектродных зонах (Рис. 4) следует, что при отсутствии нефтезагрязнителя в катодной области процессы оттока жидкости преобладают над испарением, что приводит к росту УЭС, а в анодной – наоборот, преобладает приток поровой жидкости, способствующей росту УЭС. Из графиков на Рис. 4б видно, что процесс коагуляции нефтепродукта, приводящий к укрупнению наиболее мелких частиц грунта, инициируется в обеих зонах при токорасходе $I \cdot t > 50$ А·ч.

В заключение модельного эксперимента была выполнена послойная выемка обработанного грунта и его визуальное обследование, основные результаты которого состоят в следующем:

- грунт из катодной зоны слабо консолидированный непрочный, по цвету не отличается от суглинка;
- грунт из анодной зоны консолидированный, содержит твердые углистые частицы темно-серого цвета, не растворимые в воде.

В более сложном варианте физическое моделирование было выполнено с дополнительным введением в анодный электрод-инъектор активной жидкости. Установлено, что при взаимодействии нефтепродукта с растворителем типа н-Гексан происходит снижение его вязкости, в результате чего интенсивность электроосмотической фильтрации от катода к аноду возрастает, в то же время замедляются процессы коагуляции нефти и консолидации грунта в анодной области [15].

На втором этапе лабораторного моделирования описанная выше методика была реализована в модели, где в качестве загрязнителя использовался 1%-ый и 2%-ый раствор серной кислоты H_2SO_4 . Ниже описаны наиболее существенные полученные результаты.

На Рис. 5 представлены графики пространственно-временных изменений относительного УЭС грунтового массива, загрязненного 1%-ым и 2%-ым растворами H_2SO_4 .

Анализ приведенного экспериментального материала позволил выявить следующие особенности физико-химических процессов, влияющих на изменения электропроводности грунта:

– в первые 12 ч электрообработки запускается процесс электролиза (график 1, Рис. 5), при этом в анодной зоне регистрируется низкое относительно других датчиков УЭС, что связано с повышением кислотности грунта вследствие разложения молекул воды с выделением кислорода;

– в период $t = 12-120$ ч после электрообработки не происходит резкого роста УЭС, проявляется эффект осушения грунта за счет его нагрева под действием электрического тока, испарение влаги приводит к росту концентрации кислоты в грунте, а скорость протекания электролиза заметно снижается;

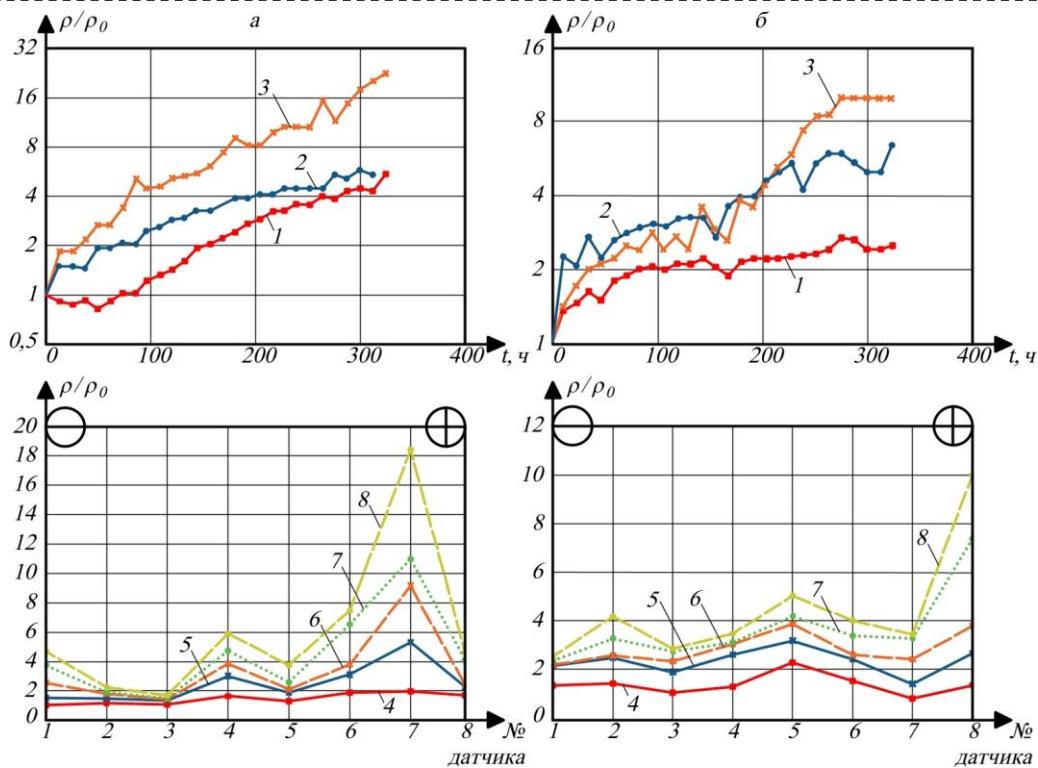


Рис. 5. Графики зависимостей относительного УЭС моделей ρ/ρ_0 от времени обработки t и номера датчика в межэлектродном пространстве грунта, загрязненного 1%-ым (а) и 2%-ым (б) раствором H_2SO_4 : 1 – катодная зона; 2 – центральная (переходная) зона; 3 – анодная зона; 4 – время обработки $t = 12$ ч; 5 – $t = 120$ ч; 6 – $t = 180$ ч; 7 – $t = 240$ ч; 8 – $t = 300$ ч

Fig. 5. Graphs of the dependences of the SER of the models ρ/ρ_0 on the processing time t and the sensor number in the interelectrode space of the soil contaminated with 1% (a) and 2% (b) H_2SO_4 solution: 1 – cathode zone; 2 – central (transition) zone; 3 – anode zone; 4 – processing time $t = 12$ h; 5 – $t = 120$ h; 6 – $t = 180$ h; 7 – $t = 240$ h; 8 – $t = 300$ h

– при $t > 120$ ч процесс электролиза прекращается, в этот момент начинает преобладать электроосмотическое движение жидкости в грунте, под действием электрического тока кислота и растворы ее солей перемещаются от анода к катоду (графики 5-8, Рис. 5), что приводит к осушению грунта, росту УЭС в анодной зоне при одновременном увеличении концентрации раствора кислоты и снижении УЭС в катодной зоне.

В данном эксперименте существенных изменений гранулометрического состава грунта после его электрообработки не зафиксировано.

При загрязнении грунта 1%-ым и 2%-ым раствором щелочи результаты физического моделирования существенно не отличались.

Основные результаты и выводы

Представленные результаты лабораторного физического моделирования процессов при электрообработке грунтов, загрязненных электрически контрастными токсикантами, позволяют сделать следующие выводы.

1. При обработке токами высокой плотности грунтов, загрязненных нефтепродуктами, наиболее значимыми для качества дезактивации являются:

– электроосмотическое перемещение флюида «природная жидкость-токсикант» от анода к катоду с возможностью последующего механического удаления;

– переход за счет термического воздействия нефтепродукта из жидкого состояния в твердое, менее экологически опасное состояние.

Интенсивность обоих процессов взаимосвязана с границами и амплитудой положительных аномалий УЭС, что позволяет вести непрерывный геофизический мониторинг эффективности очистки грунта от нефтезагрязнений.

2. Контроль процессов дезактивации грунтов, загрязненных неорганическими кислотами (щелочами), включающих электролиз, испарение влаги и электроосмотическое перемещение токсиканта, обеспечивается по изменениям УЭС в приэлектродных и центральной зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Королев В. А. Очистка грунтов от загрязнений. Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Геол. фак. Москва : Наука / Интерпериодика, 2001. 364 с.

- Аренс В. Ж., Саушкин А. З., Гридин О. М. [и др.] Очистка окружающей среды от

- углеводородных загрязнений. Москва : Интербук, 1999. 371 с.
3. Простов С. М., Куликова Ю. А., Теплухина А. Н. Способы и устройства для очистки грунтов от загрязнений // под ред. Простова С. М. Кемерово : КузГТУ, 2014. 156 с.
 4. Ломизе Г. М., Нетушил А. В. Электроосмотическое водопонижение. Москва; Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. 178 с.
 5. Странченко С. Г., Должиков П. Н., Шубин А. А. Исследование параметров химического и электрохимического закрепления грунтов. Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2009. 198 с.
 6. Простов С. М., Покатилов А. В., Рудковский Д. И. Электрохимическое закрепление грунтов. РАЕН. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. 294 с.
 7. Жинкин Г. Н., Калганов В. Ф. Электрохимическая обработка глинистых грунтов в основаниях сооружений. Москва : Стройиздат, 1980. 164 с.
 8. Злочевская Р. И. Электроповерхностные явления в глинистых породах. Москва : Из-во МГУ, 1988. 177 с.
 9. Королев В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. Москва : ООО «Сам полиграфист», 2015. 468 с.
 10. Королев В. А. К методике определения параметров массопереноса и электрохимических явлений в грунтах на основе термодинамики необратимых процессов // Инженерная геология. 2020. Т. 15. № 4. С. 20–28.
 11. Korolev V. A. Electrokinetic remediation of oil-contaminated soils / Korolev V. A., Romanyukha O. V., Abyzova A. M. // Journal of Environmental Science and Health. Part A: Toxic / Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2008. T. 43. № 8. C. 876–880.
 12. Darmawan S.-I Wada. Effect of clay mineralogy on the feasibility of electrokinetic soil decontamination technology // Journal applied clay science. 2022. Vol. 20. Issue 6. Pp. 283–293.
 13. De Gioannis G., Muntoni A., Raggeri R., Zijstra J.J.P. Chromate adsorption in a trans-formed red mud reactive barrier using electrokinetics // Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering. 2008. Vol. 43. Issue 8. Pp. 969–974.
 14. Gustav Loch, Ana Teresa Lima, Pieter J. Kleingeld. Geochemical effects of electro-osmosis in clays // Journal of applied electrochemistry. 2010. Vol. 40. Issue 6. Pp. 1240–1254.
 15. Простов С. М., Шабанов Е. А., Бушуев А. А. Экспериментально-аналитическое обоснование метода непрерывного мониторинга процессов загрязнения грунтов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025 5 номер. Том. №. С.
 16. 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.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Простов Сергей Михайлович, профессор кафедры СПиЭН, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), доктор техн. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>, e-mail: psm.tigm@kuzstu.ru.

Шабанов Евгений Анатольевич, заведующий кафедрой СПиЭН, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), кандидат техн. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>, e-mail: shabanovea@kuzstu.ru.

Бушуев Александр Александрович, аспирант, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8422-2556>, e-mail: bushueva@kuzstu.ru.

Заявленный вклад авторов:

Простов Сергей Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы.

Шабанов Евгений Анатольевич – концептуализация исследования, научный менеджмент, сбор и анализ данных.

Бушуев Александр Александрович – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста, подготовка графической части и таблиц.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article**MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN ELECTRICAL TREATMENT OF SOILS CONTAMINATED WITH ELECTRICALLY CONTRASTING TOXICANTS****Sergey M. Prostov, Evgeniy A. Shabanov, Alexander A. Bushuev**

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: bushuevaa@kuzstu.ru

Abstract.

Soil contamination with ecotoxicants (organic, inorganic, bioorganic, radioactive) is a very serious environmental problem. The objective of the work is to establish patterns of spatiotemporal changes in the physical properties of sandy-clayey soils contaminated with high-resistance (oil products) or low-resistance (solutions of inorganic substances) ecotoxicants, and the relationships between them during electrical treatment. Using a laboratory model of a two-electrode installation with real physical and technological parameters, it was established that three characteristic zones of approximately equal width are formed during treatment with high-density currents: an anode zone, from which, under the action of an electric field, a progressive electroosmotic movement (outflow) of the natural liquid and the organic toxicant particles captured by it towards the cathode occurs; a cathode zone, in which the displaced liquids with properties changed during the movement accumulate; and a central (transitional) zone, in which a gradual change in the properties of the liquids occurs. When treating soils contaminated with oil products, the most significant for decontamination are: electroosmotic movement of the fluid «natural liquid-toxicant» from the anode to the cathode with the possibility of subsequent mechanical removal; transition due to the thermal effect of the oil product from a liquid state to a solid, less environmentally hazardous state. The intensity of both processes is interconnected with the boundaries and amplitude of positive anomalies of the specific electrical resistance (SER), which allows for continuous geophysical monitoring of the processes. Control of the processes of decontamination of soils contaminated with inorganic acids (alkalis), including electrolysis, moisture evaporation and electroosmotic movement of the toxicant, is ensured by changes in SER in the near-electrode and central zones.

Article infoReceived:
01 April 2025Accepted for publication:
15 November 2025Accepted:
02 December 2025Published:
22 December 2025

Keywords: Oil product, inorganic pollutant, specific electrical resistance, humidity, density, particle size distribution.

For citation: Prostov S.M., Shabanov E.A., Bushuev A.A. Modeling of physical processes in electrical treatment of soils contaminated with electrically contrasting toxicants. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 6(172):65-74. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-65-74, EDN: HOMXCZ

REFERENCES

1. Korolev V.A. Cleaning soils from pollution. Moscow: Science / Interperiodica; 2001. 364 p. (in Russ.)
2. Arens V.Zh., Saushkin A.Z., Gridin O.M. Cleaning the environment from hydrocarbon pollution. Moscow: Interbook; 1999. 371 p. (in Russ.)
3. Prostov S.M., Kulikova Y.A., Tepluhina A.N. Methods and devices for cleaning soils from contaminants. Kemerovo: KuzSTU; 2014. 156 p. (in Russ.)
4. Lomize G.M., Netushil A.V. Electroosmotic dewatering. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat; 1958. 178 p. (in Russ.)
5. Stradanchenko S.G., Dolzhikov P.N., Shubin A.A. Research of parameters of chemical and electrochemical soil stabilization. Novocherkassk: SRSPU (NPI); 2009. 198 p. (in Russ.)
6. Prostov S.M., Pokatilov A.V., Rudkovskyi D.I. RANS. Electrochemical soil stabilization. Tomsk: Tomsk University Publishing House; 2011. 294 p. (in Russ.)
7. Zhinkin G.N., Kalganov V.F. Electrochemical treatment of clay soils in the foundations of structures. Moscow: Stroyizdat; 1980. 164 p. (in Russ.)
8. Zlochevskaya R.I. Electrosurface phenomena in clay rocks. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1988. 177 p. (in Russ.)

9. Korolev V.A. Theory of electrosurface phenomena in soils and their application. Moscow: OOO «Sam polygraphist»; 2015. 468 p. (in Russ.)
10. Korolev V.A. Towards a method for determining the parameters of mass transfer and electrokinetic phenomena in soils based on the thermodynamics of irreversible processes. *Engineering geology*. 2020; 15(4):20–28. (in Russ., abstract in Eng.)
11. Korolev V.A., Romanyukha O.V., Abyzova A.M. Electrokinetic remediation of oil-contaminated soils. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Toxic / Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2008; 43(8):876–880. (in Eng.)
12. Darmawan S.-I Wada. Effect of clay mineralogy on the feasibility of electrokinetic soil decontamination technology. *Journal applied clay science*. 2002; 20(6):283–293. (in Eng.)
13. De Gioannis G., Muntoni A., Raggeri R., Zijstra J.J.P. Chromate adsorption in a trans-formed red mud reactive barrier using electrokinetics. *Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic / Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 2008; 43(8):969–974. (in Eng.)
14. Gustav Loch, Ana Teresa Lima, Pieter J. Kleingeld. Geochemical effects of electroosmosis in clays. *Journal of applied electrochemistry*. 2010; 40(6):1240–1254. (in Eng.)
15. Prostov S.M., Shabanov E.A., Bushuev A.A. Modeling of physical processes in electrical treatment of soils contaminated with electrically contrasting toxicants. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta=Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 202x; x(x):x–x. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: x.
16. Shabanov E.A., Prostov S.M., Gerasimov O.V. Laboratory researches of the processes of electrochemical cleaning of soils in the foundations of operating buildings and structures from petroleum products. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2019; 21(4):168–180.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

access article under the CC BY license

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

- Sergey M. Prostov**, professor of the Department of Construction Production and Real Estate Expertise, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), Dr. Sc. In Engineering, Professor, e-mail: psm.tigm@kuzstu.ru.
- Evgeniy A. Shabanov**, Head of the Department of Construction Production and Real Estate Expertise, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), C. Sc. In Engineering, Associate Professor, e-mail: shabanovea@kuzstu.ru.
- Alexander A. Bushuev**, Postgraduate Student, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: bushuevaa@kuzstu.ru.

Contribution of the authors:

- Sergey M. Prostov – formulation of the research problem, scientific management, conceptualization of the study, data collection and analysis, conclusions.
- Evgeniy A. Shabanov – research conceptualization, scientific management, data collection and analysis.
- Alexander A. Bushuev – review of relevant literature, data collection and analysis, writing text, preparing graphics and tables.

All authors have read and approved the final manuscript.

