

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

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: 10.26730/1999-4125-2026-1-65-76

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗОН ЗАГРЯЗНЕНИЯ И КОНТРОЛЯ  
ПРОЦЕССОВ ИХ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Простов Сергей Михайлович, Шабанов Евгений Анатольевич,  
Бушуев Александр Александрович

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

\* для корреспонденции: bushuevaa@kuzstu.ru

**Аннотация.**

Обоснована перспективность и выполнена экспериментальная проверка эффективности применения электрофизического метода для диагностирования зоны, искусственно загрязненной нефтепродуктами или растворами кислоты (щелочи), в натуральных условиях на специальном полигоне методом электрзондирования, а также для контроля процессов электрообработки зоны загрязнения с помощью системы микрозондов. Установлено, что зоны загрязнения приповерхностных слоев песчано-глинистых грунтов электрически контрастными нефтепродуктами (маслами, бензинами и др.) и растворами неорганических соединений (кислот, щелочей) уверенно диагностируются по результатам вертикальных электрических зондирований и электропрофилирования соответственно по положительным и отрицательным аномалиям эффективного удельного электросопротивления (УЭС). Непрерывный мониторинг при электрообработке процессов осмотического переноса загрязненной поровой жидкости с возможностью ее последующей откачки, осушения грунта и коагуляции нефтяных компонентов с преобразованием их в нерастворимое твердое, менее токсичное состояние обеспечивается по изменениям УЭС путем установки в межэлектродном пространстве микрозондов или интегрально с использованием в качестве измерительных электродов-инъекторов. На опытной установке в натуральных условиях при электрообработке грунта, искусственно загрязненного нефтепродуктами с коэффициентом загрязнения  $K_{30} = 7\%$ , по вариациям эффективного УЭС зафиксированы процессы коагуляции нефтяной основы и изменения гранулометрического состава грунтов, при этом конечные значения составили: для загрязнения маслом  $K_3 = 3,64\%$ , для загрязнения бензином  $K_3 = 4,55\%$ . В межэлектродном пространстве при электрообработке зоны загрязнения кислотой преобладающими являются: на начальном этапе осмотическое перемещение раствора кислоты от катода к аноду и повышение концентрации ионов вследствие электролитического разложения воды; при последующей обработке при прогреве массива преобладающим становится его осушение с потерей влаги, что приводит к росту УЭС, особенно в приэлектродных зонах.

**Информация о статье**

Поступила:

01 апреля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

19 марта 2026 г.

**Ключевые слова:**

Загрязнение, нефтепродукты,  
кислота, щелочь,  
электросопротивление,  
зондирование, микрозонд

**Для цитирования:** Простов С.М., Шабанов Е.А., Бушуев А.А. Испытание электрофизического метода диагностирования зон загрязнения и контроля процессов их электрообработки в природных условиях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 1 (173). С. 65-76. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-65-76, EDN: YWRMNP

### Введение

Проблема очистки грунтов от экотоксикантов весьма серьезна и с накоплением опасных отходов усиливается. Известен целый ряд методов дезактивации загрязненных грунтов (физических, физико-химических, химических, биологических), однако информация об их успешном применении в природных и особенно в производственных условиях достаточна редка.

Целый ряд публикаций посвящен применению биологических методов, основанных на использовании микроорганизмов для очистки от нефтяных загрязнений. Так, в работе [1] этот метод применен в сочетании с химическими реагентами и специальными агротехническими приемами. Также для удаления нефтяного загрязнения успешно применена технология CLEANSOIL, сочетающая физико-химический и биологический способы [2], а использование углеводородоокисляющих микроорганизмов в сочетании с биосорбентами позволило снизить содержание нефти в воде и грунте на 30-44% [3]. Перспективно использование химико-биологического метода для переработки нефтепродуктов, которых на настоящий момент накоплено более 1,5 млрд т [4].

Длительное время в МГУ им. М. Ломоносова ведутся фундаментальные исследования в направлении электрообработки загрязненных грунтов, которая предполагает комплексное воздействие, включающее электроосмос, электрофорез, электролиз, нагревание. Установлены закономерности физико-химических и термодинамических процессов, взаимосвязанных с массопереносом в глинистых грунтах при электроосмосе [5-7].

В зарубежных лабораториях также активно изучаются особенности электрохимических процессов, в частности, влияние минерального состава глин, кислотности, окислительно-восстановительного потенциала, а также металла электродов на процессы электроосмотической консолидации и осуществимость электрокинетической дезактивации почвы [8-12].

Одной из существенных причин недостаточно активного применения технологий дезактивации загрязненных грунтов в месте их залегания является отсутствие надежных, информативных и недорогих методов контроля процессов обработки грунтов. Прямые методы определения концентрации экотоксикантов в грунте (инфракрасной спектроскопии, ультрафиолетовой люминесценции, газовой и

газо-жидкостной хроматографии) весьма трудоемки (предполагают обязательную выемку образцов грунта), требуют дорогостоящего лабораторного оборудования, не адаптированы к полевым условиям.

Известен опыт диагностирования почвенного слоя г. Кирова химико-биологическим методом, включающим измерение содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов, pH водной и солевой вытяжки в комплексе со специальными биологическими тест-объектами трофических групп [13]. Весьма перспективно использование анализа изменений гранулометрического состава глинистых грунтов, загрязненных углеводородами, поскольку установлено, что при загрязнении глин, суглинков и супесей машинным маслом с концентрацией до 2,5% в них происходят процессы коагуляции нефтепродукта, а при увеличении степени загрязнения – диспергации [14].

Между тем хорошо известен метод электроразведки, применяемый как для поиска месторождений полезных ископаемых, так и для решения различных задач горнопромышленной экологии. Например, теоретически и экспериментально доказана эффективность применения электрических зондирований для диагностирования влагонасыщенных оползнеопасных зон прибортовых массивов угольных разрезов [15] или локации очагов эндогенных пожаров в угольных скоплениях [16]. Методы электроразведки весьма разнообразны, они позволяют оценивать расположение, размеры и свойства как высоко-, так и низкопроводящих аномальных зон, как на больших интервалах и глубинах с помощью мощных зондирующих установок, так и практически в точке при применении микрозондов. Активно развиваются бесконтактные электромагнитные методы подповерхностных зондирований (георадиолокация), значительно повышающие оперативность измерений.

Идея использования электрофизического метода для диагностирования зон, загрязненных электрически контрастными токсикантами, и контроля процессов их восстановления в месте залегания развивается в КузГТУ уже несколько лет. В перспективе данный метод позволит реализовать системы удаленного и автоматизированного мониторинга пространственно-временных процессов в грунтах на больших открытых площадях, а также в грунтовых основаниях сооружений.

Экспериментально-аналитическое обоснование метода электрофизического мониторинга для решения задач экологической направленности в лабораторном варианте с использованием погружных микродатчиков (зондов) для оценки степени загрязнения образцов грунтов нефтепродуктами и неорганическими соединениями (кислотами, щелочами) изложено в статьях [17, 18]. Поскольку микрозонд имеет базу измерений  $AB = 3-6$  см, контролируемая величина представляет собой истинное удельное электросопротивление (УЭС)  $\rho$  в точке измерений. На образцах и физических моделях установлено, что изменение коэффициента загрязнения можно оценивать по изменению относительного УЭС  $\rho/\rho_0$  ( $\rho_0$  – величина УЭС грунта без загрязнителя).

Решение прямой задачи электроразведки (расчета электрического поля по известному геологическому разрезу) сводится к решению уравнения Лапласа при традиционных граничных условиях на бесконечности и границах сред. Если аппроксимировать загрязненную аномальную зону сферой, то решение уравнения Лапласа для потенциала  $\varphi$  на земной поверхности в сферических координатах с началом в центре сферы  $O_1$  будет иметь вид полинома [16]:

$$\varphi = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{R} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_n \frac{a^{2n+1}}{(dr)^{n+1}} P_n(\cos \theta) \right], \quad (1)$$

где  $I$  – ток в питающей цепи АВ установки АМNB, А;  $\rho_1$  – УЭС грунтового массива до загрязнения, Ом·м,  $R = AM$  – база установки, м;  $a$  – радиус сферы, м;  $r = O_1M$  – радиальная координата расчетной точки, м;  $d = O_1A$  – координата «питающего электрода», м;  $P_n(\cos \theta)$  – многочлены Лежандра;  $\theta$  –  $\angle AO_1M$  – угловая координата, рад.;  $k_n$  – коэффициент «отражения» тока от границы сред:

$$k_n = \frac{n(\rho_2 - \rho_1)}{(n+1)(\rho_2 + \rho_1)}, \quad (2)$$

где  $\rho_2$  – УЭС загрязнителя (заполнителя сферы), Ом·м.

Для предельной установки ( $r \ll d$ ) выражение (1) упрощается и допускает переход к прямоугольной координате  $x$ . Взяв производную от функции  $\varphi(x)$ , получают горизонтальную составляющую напряженности однородного электрического поля  $E_x = \delta\varphi/\delta x$ , а, используя закон Ома – функцию эффективного (кажущегося) УЭС:

$$\rho_k(x) = \rho_1 + 2a^3\rho_1 \frac{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) - 1}{2\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) + 1} \frac{h^2 - 2x^2}{(h^2 + x^2)^{2.5}}, \quad (3)$$

где  $h$  – глубина расположения центра сферы, м.

Из уравнения (2) следует, что при  $\rho_2/\rho_1 > 1$  (загрязнитель с высоким УЭС) аномалия положительная, а при  $\rho_2/\rho_1 < 1$  (загрязнитель с низким УЭС) – отрицательная. Над центром  $O_1$

( $x = 0$ ) аномалии имеет место глобальный экстремум функции  $\rho_k(x)$ , а в точках  $x = x_1$  и  $x = -x_1$  – локальные экстремумы малой амплитуды.

Решение обратной задачи электроразведки (определение геологического разреза по электрическому полю) в данном случае возможно тремя путями.

1. Приравнявая нулю производную  $\partial\rho_k(x)/\partial(x)$ , подставляя координату локального экстремума  $x = x_1$ , можно получить  $h = x_1\sqrt{6/3}$ , а подставляя в уравнение (2)  $x = 0$ :

– для случая  $\rho_2 \gg \rho_1$  (загрязнитель – диэлектрик) получим:

$$a = h^3 \sqrt{\frac{\rho_{kmax}}{\rho_1}}; \quad (4)$$

– для случая  $\rho_2 \ll \rho_1$  (загрязнитель – проводник) получим:

$$a = h^3 \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho_{kmin}}{\rho_1}\right)}. \quad (5)$$

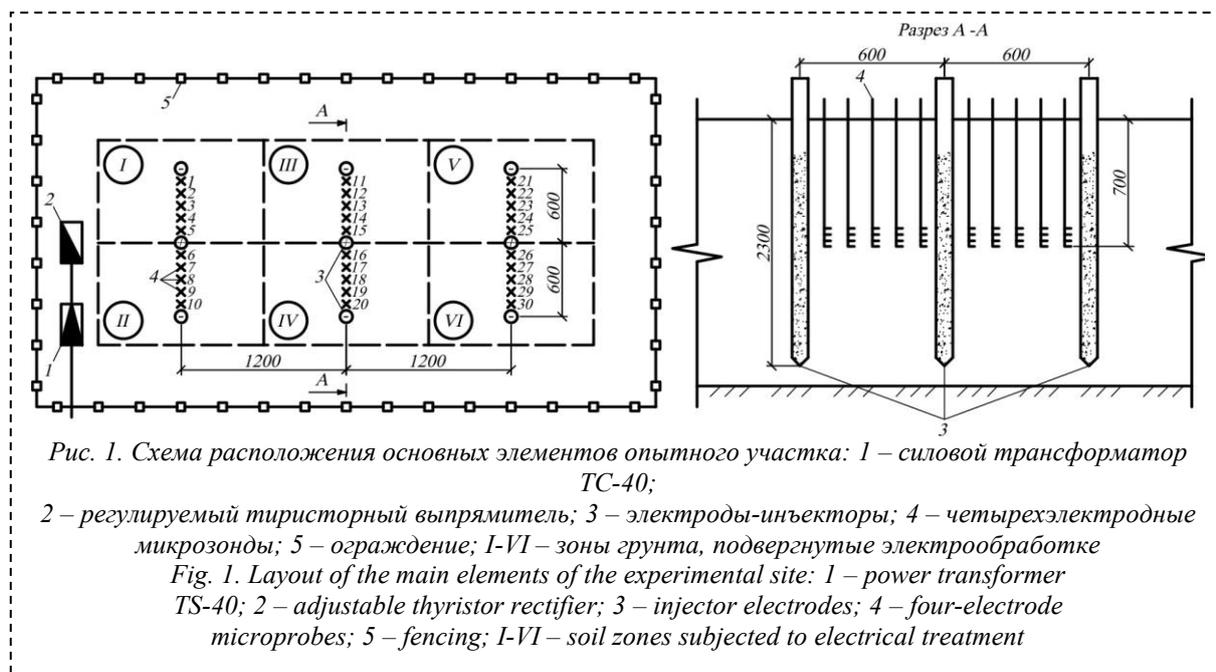
Поскольку в приведенных расчетах сделаны существенные допущения, точность полученных значений  $h$  и  $a$  невелика.

2. Повысить точность расчета можно с помощью алгоритма, предложенного в работе [19], использующего для расчета координаты точек экстремумов на экспериментальном графике  $\rho_k(x)$ :  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Существо алгоритма сводится к подбору методом наименьших квадратов параметров  $a$ ,  $h$  и  $\rho_2/\rho_1$ , удовлетворяющих минимуму целевой функции:

$$\Phi = \sum_{i=1}^3 [\rho_{ki} - \rho_k(a, h, \rho_2/\rho_1, x_i)]^2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

Поскольку функция (6) может иметь несколько экстремумов, для отыскания ее минимума предложено использовать метод адаптивного случайного поиска.

3. Поскольку реальная зона загрязнения может существенно отличаться от сферы, для повышения точности диагностирования загрязненных зон целесообразно использовать два экспериментальных графика: вертикально электрического зондирования  $\rho_k(AB)$  (ВЭЗ) и электропрофилеирования  $\rho_k(x)$  (ЭП). При этом глубину верхней границы зоны загрязнения  $h_v$  принимают по значению  $AB_v$ , соответствующему началу положительной (отрицательной) аномалии на графике ВЭЗ с учетом экспериментально определенного коэффициента глубинности зондирования  $K_\Gamma$ , диапазон которого для условий Кузбасса составляет  $K_\Gamma = 0,1-0,17$ . Границы нижней границы исследуемой зоны  $h_n$  целесообразно принимать по границе водоупорного слоя грунтового массива. Границы зоны загрязнения в плане определяют по границам положительной (отрицательной) аномалии на графике ЭП, выполняемого с разносом установки  $AB > AB_v$ .



Целью данной работы является экспериментальная проверка эффективности применения электрофизического метода для диагностирования зоны, искусственно загрязненной нефтепродуктами и растворами кислоты, в натуральных условиях на специальном полигоне методом электроразведки, а также для контроля процессов электрообработки зоны загрязнения с помощью системы микрозондов.

#### Методика проведения исследования

Исследования выполнены на опытном полигоне ООО «НООЦЕНТР» (г. Кемерово). Принципиальное отличие натуральных условий от лабораторной установки состояли в следующем: объем грунта не ограничен; учитывается взаимодействие зоны обработки с прилегающими территориями и атмосферой; применяется многоэлектродная установка электрообработки.

Схема опытной установки представлена на Рис. 1.

Все измерения УЭС проводили компьютеризированным прибором «Электротест-2Pm/bt», оснащенным устройством компенсации поляризации электродов и энергонезависимой памятью.

Основные технические характеристики экспериментальной установки следующие:

- количество обрабатываемых зон (пар электродов-инъекторов) – 6;
- размеры зоны искусственного загрязнения (длина×ширина×глубина) – 3,6×1,2×2,0 м;
- диапазон напряжений – 0-360 В;
- максимальный ток (плотность тока) обработки – 40 А (20 А/м<sup>2</sup>);
- время электрообработки (токорасхода) 1 этап – 16844 (3650 А·ч), 2 этап – 21044 (4360 А·ч).

Эксперимент включал 2 этапа: загрязнение грунта нефтепродуктами; загрязнение растворами кислот и щелочи.

Искусственное загрязнение грунта экотоксикантами проводилось следующим образом. В грунтовом массиве, поверхность которого была очищена от растительно-плодородного слоя, бурили шпуров диаметром 10-12 мм глубиной 70-100 см с шагом 8-10 см. Затем на поверхность грунта разливался жидкий загрязнитель (нефтепродукт, водный раствор кислоты или щелочи), при этом кислотный (щелочной) раствор подавался порциями для исключения разлива на соседние зоны. Процесс насыщения грунта загрязнителем продолжался 48 ч, после чего проводили начальное электрическое зондирование, устанавливали датчики-микрозонды на глубину 50 см, выполняли электрообработку, а после ее завершения – заключительное зондирование. Процесс электрообработки велся непрерывно с перерывами на снятие замеров с микрозондов. Распределение загрязнителей по зонам грунтового массива на двух этапах эксперимента представлено в Таблице 1.

На первом этапе эксперимента исследовались процессы загрязнения грунтов нефтепродуктами.

#### Результаты и обсуждение исследования

На Рис. 2 представлены результаты вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропрофилеирования (ЭП) на всех стадиях эксперимента.

Из приведенных графиков следует, что зона искусственного загрязнения нефтепродуктами диагностируется на графиках ВЭЗ положительной аномалией эффективного УЭС  $\rho_k$  в диапазоне АВ = 9-24 м, что при коэффициенте глубинности  $K_\Gamma = 1,0$  соответствует интервалу h

= 0,9-2,4 м. На графике ЭП при разное установки АВ = 15 м положительная аномалия  $\rho_k$  зафиксирована на интервале  $x = -4-0$  м. Выявленные размеры и расположение аномалий вполне соответствуют геометрическим параметрам искусственно загрязненной нефтепродуктами зоны.

жидкости и загрязнителя; изменение агрегатного состояния жидкостей (испарения, коагуляция). Для интерпретации результатов эксперимента после окончания электрообработки были отобраны образцы грунтов из зон I-VI исследуемого массива и проведены их лабораторные испытания, результаты которых

Таблица 1. Распределение загрязнителей по зонам опытного участка

Table 1. Distribution of pollutants by zones of the experimental site

Зона (рис. 1)	1 этап	2 этап
I	Бензин А-80 с последующей обработкой растворителем	1%-ый раствор $H_2SO_4$ , н-Гексан
II	Отработанное масло Shell Helix Ultra с последующей обработкой растворителем н-Гексан	1%-ый раствор $H_2SO_4$ с последующей обработкой 1%-ым раствором NaOH
III	Бензин А-80	1%-ый раствор $H_2SO_4$ с последующей обработкой водой
IV	Отработанное масло Shell Helix Ultra	1%-ый раствор NaOH
V	Чистый грунт	1%-ый раствор NaOH с последующей обработкой водой
VI	Чистый грунт	Чистый грунт

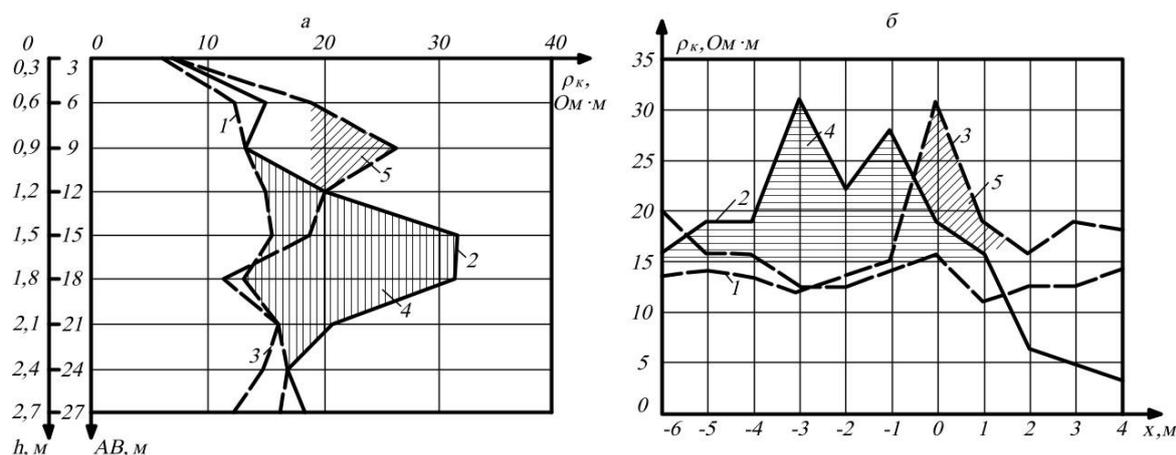


Рис. 2. Результаты ВЭС (а) и ЭП (АВ = 15 м) (б) первого этапа:

1 – до загрязнения; 2 – после загрязнения; 3 – после электрообработки;

4 – зона исходного искусственного загрязнения; 5 – зона остаточного загрязнения

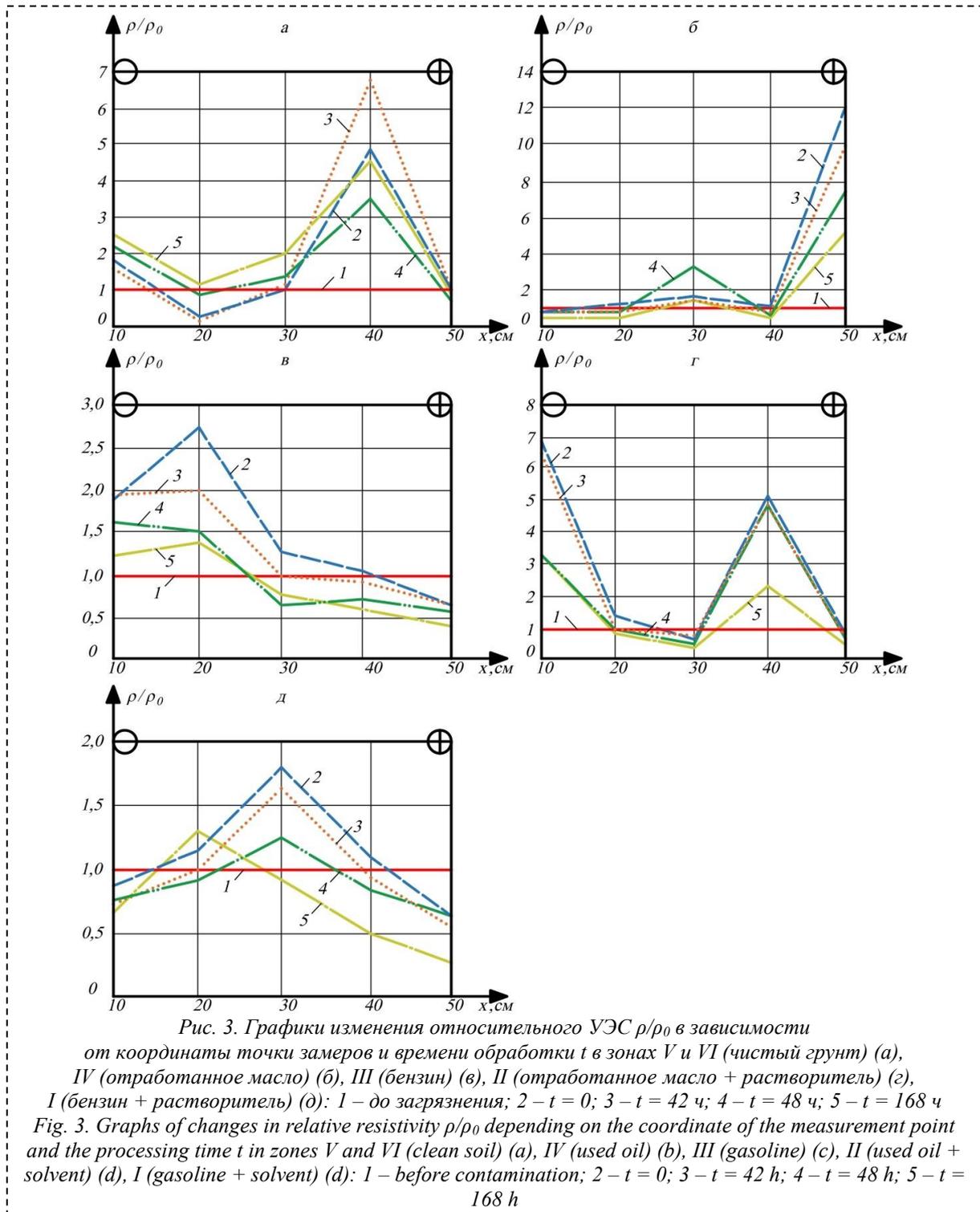
Fig. 2. Results of VES (a) and EP (AB = 15 m) (b) of the first stage: 1 – before pollution; 2 – after pollution; 3 – after electrical treatment; 4 – zone of initial artificial pollution; 5 – zone of residual pollution

Контроль пространственно-временных процессов, определяющих изменения состояния и свойств грунтового массива в межэлектродном пространстве, в процессе электрообработки обеспечивался по значениям истинного УЭС  $\rho$ , полученного микрозондами. На Рис. 3 представлены графики относительного изменения УЭС  $\rho/\rho_0$  в зависимости от расположения датчика (координаты) и времени обработки  $t$ .

Из графиков следует, что в межэлектродном пространстве происходит комплекс сложных физико-химических процессов, влияющих на электропроводящие свойства грунтов: электроосмотическое перемещение природной

представлены в Таблицах 2 и 3. Кроме того, в заключительной стадии эксперимента приэлектродные зоны грунта были вскрыты и произведен их визуальный осмотр.

Совместный анализ информации, полученный в результате полевых геофизических и лабораторных исследований, с учетом результатов лабораторного моделирования двухэлектродной установки электрообработки, изложенных в статье [18], позволил получить следующие основные закономерности, имеющие значения для контроля качества дезактивации загрязненных нефтепродуктами грунтов электрофизическим методом:



– на всех стадиях электрообработки природная поровая влага в результате электроосмоса перемещается от анода к катоду, при этом параллельно происходит ее испарение с уменьшением влажности на 15-20%, наиболее интенсивно в приэлектродных зонах, где плотность тока наибольшая, что требует периодического корректирования режима электрообработки для поддержания достаточной плотности тока  $j > 10$  А/м<sup>2</sup> (повышение

напряжения или добавления воды в электроды-инъекторы);

– автомобильное масло при естественной вязкости незначительно перемещается потоком жидкости, при добавлении в электроды растворителя вязкость масла снижается, и оно более интенсивно перемещается к катоду, допуская частичную откачку, при этом в приэлектродных зонах, особенно в катодной, наблюдается интенсивная коагуляция нефтепродукта с образованием нерастворимого

твёрдого слоя, консолидирующаяся на частицах наиболее мелких фракций грунта, что приводит к уменьшению содержания фракции < 0,1 мм на 40% и увеличению фракций 0,1 мм на 48%, а 0,25 мм на 37%;

– бензин вследствие низкой вязкости интенсивно переносится потоком поровой жидкости от катода к аноду, скопление водо-бензиновой эмульсии частично может быть откачено, при этом процессы коагуляции значительно менее интенсивны (снижение содержания фракции < 0,1 мм менее 25%), а введение при обработке растворителя изменяет интенсивность процессов фильтрации незначительно.

Таким образом, положительный эффект электрообработки нефтезагрязнённых грунтов включает следующие практические результаты:

– возможность частичной откачки водо-масляной и водо-бензиновой эмульсии через анодный электрод-иньектор;

– усиление эффекта коагуляции нефти, ранее выявленное в работе [14], с переходом ее в растворимое твёрдое агрегатное состояние, менее экологически опасное.

Поскольку результаты проведенных

лабораторных и шахтных экспериментальных исследований доказывают взаимосвязь УЭС с физико-химическим состоянием и свойствами грунтов, загрязнённых нефтепродуктами, целесообразно перейти к усредненному (интегральному) электрофизическому параметру, комплексно отражающему эффективность проведенной электрообработки и позволяющему своевременно корректировать ее режим. Таким параметром является эффективное УЭС межэлектродного пространства  $\rho_k$ , для измерения которого питающие электроды А и В заземляют по оси установки на расстоянии 8-12 м от ее центра, а в качестве измерительных электродов используют сами иньекторы. На Рис. 4а представлены графики зависимостей относительного УЭС  $\rho_k/\rho_0$ , полученные путем измерений по описанной выше методике для всех зон обработки.

Из графиков следует, что на интервале  $t = 0-48$  ч величина  $\rho_k$  грунтов, загрязнённых маслом и бензином, монотонно снижается, что связано с коагуляцией нефтяной основы и изменениями гранулометрического состава грунтов, в дальнейшем приводящее к росту УЭС.

Таблица 2. Отношения конечных физических параметров к значениям до обработки  
Table 2. Ratios of final physical parameters to values before processing

Состояние грунта	Влажность	Плотность во влажном состоянии	Плотность в сухом состоянии
Без загрязнения	0,974	0,951	0,993
Загрязнение маслом	0,851	0,950	0,967
Загрязнение бензином	0,772	0,940	0,975
Загрязнение маслом с растворителем	0,781	0,937	0,987
Загрязнение бензином с растворителем	0,747	0,947	0,987

Таблица 3. Отношения конечных значений содержания фракций грунта к начальным  
Table 3. Ratios of final values of soil fraction content to initial values

Состояние грунта	Фракция, мм				
	2	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Без загрязнения	1,100	1,051	1,122	1,128	0,883
Загрязнение маслом	1,500	1,148	1,374	1,484	0,599
Загрязнение бензином	1,250	1,119	1,194	1,298	0,757
Загрязнение маслом с растворителем	1,140	1,011	1,071	1,564	0,746
Загрязнение маслом с растворителем	1,400	1,097	1,239	1,649	0,672

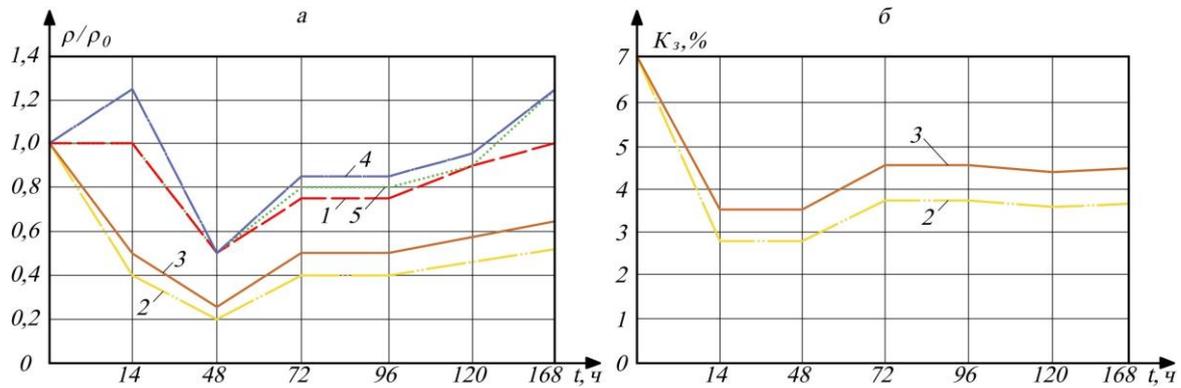


Рис. 4. Графики относительного изменения интегрального УЭС  $\rho_k$  (а) и расчетного значения коэффициента загрязнения  $K_3$  (б) в различных зонах грунтового массива в процессе электрообработки: 1 – V – VI зоны (чистый грунт); 2 – IV (загрязнение автомобильным маслом); 3 – III (загрязнение бензином); 4 – II (загрязнение автомобильным маслом с растворителем); 5 – I (загрязнение бензином с растворителем)

Fig. 4. Graphs of the relative change in the integral SER  $\rho_k$  (a) and the calculated value of the pollution factor  $K_3$  (b) in different zones of the soil massif during electrical treatment: 1 – V – VI zones (clean soil); 2 – IV (pollution with motor oil); 3 – III (pollution with gasoline); 4 – II (pollution with motor oil with solvent); 5 – I (pollution with gasoline with solvent)

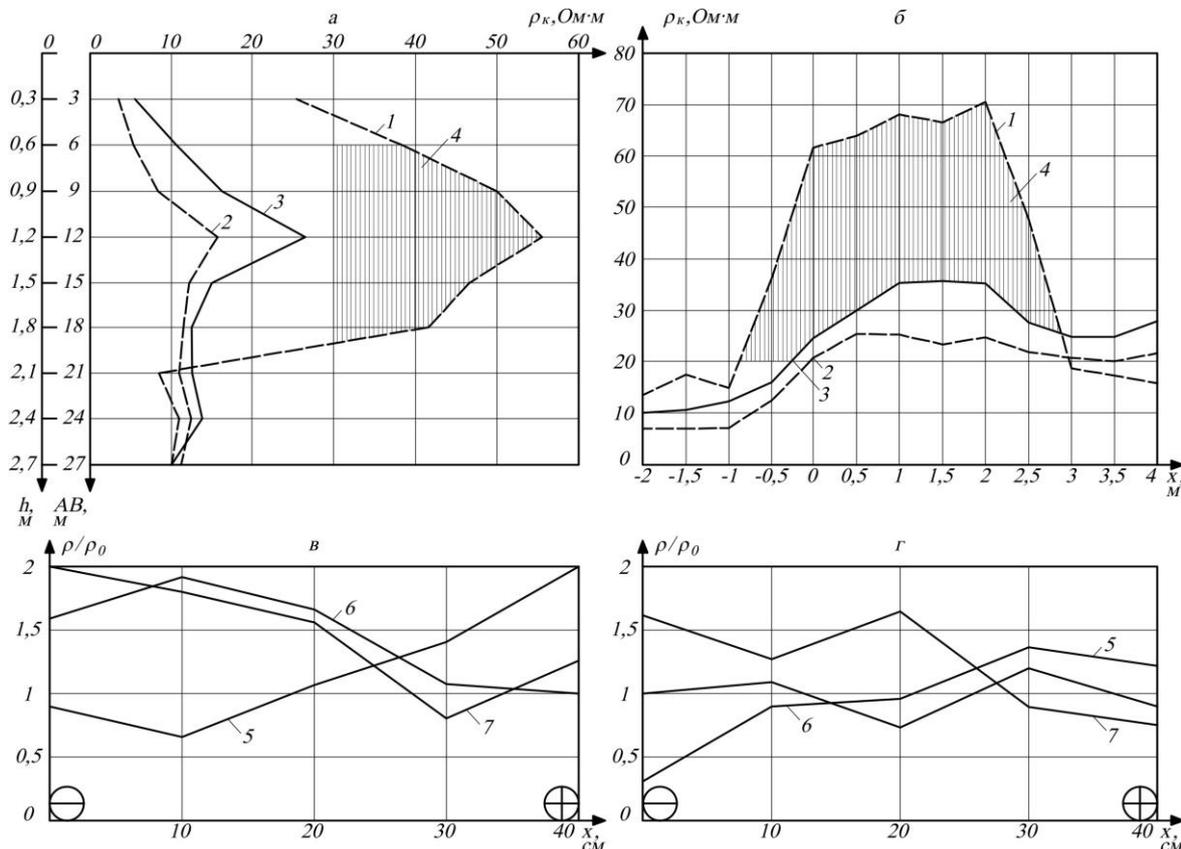


Рис. 5. Результаты ВЭС (а), ЭП ( $AB = 15 \text{ м}$ ) (б) над участком загрязнения органическими экотоксикантами, изменение относительного УЭС  $\rho/\rho_0$  в межэлектродном пространстве в зонах загрязнения 1%-ым раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (в) и с нейтрализацией 1%-ым раствором  $\text{NaOH}$  (г): 1 – до загрязнения; 2 – после загрязнения; 3 – после электрообработки; 4 – аномалия, соответствующая зоне загрязнения; 5 – время электрообработки  $t = 24 \text{ ч}$ ; 6 –  $t = 96 \text{ ч}$ ; 7 –  $t = 192 \text{ ч}$

Fig. 5. Results of VES (a), EP ( $AB = 15 \text{ m}$ ) (b) over the area contaminated with organic ecotoxicants, change in relative resistivity  $\rho/\rho_0$  in the interelectrode space in zones of contamination with 1%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  solution (c) and with neutralization with 1%  $\text{NaOH}$  solution (d): 1 – before contamination; 2 – after contamination; 3 – after electrical treatment; 4 – anomaly corresponding to the contamination zone; 5 – time of electrical treatment  $t = 24 \text{ h}$ ; 6 –  $t = 96 \text{ h}$ ; 7 –  $t = 192 \text{ h}$

Разжижение нефтепродукта растворителем в значительной мере сглаживает описанные процессы, усиливая электроосмотическую миграцию порозаполняющей жидкости, и ослабляет процессы изменения агрегатного состояния загрязнителя (термо-коагуляции). Графики на рис. 4а качественно отражают эффективность термообработки в реальном масштабе времени.

Из результатов лабораторной тарировки метода [17] зависимость изменения коэффициента загрязнения от относительного изменения УЭС в простейшем случае может быть принята прямо пропорциональной, откуда следует уравнение:

$$K_3(t) = K_{30} \frac{\rho_k(t)}{\rho_{k0}}, \quad (7)$$

где  $K_{30}$  – начальное значение  $K_3$ , в эксперименте определяемое по соотношению объема внедренного в грунт загрязнителя к объему обрабатываемой зоны,  $K_{30} = 7\%$ .

Подстановкой в уравнение (7) данных Рис. 4а получены зависимости  $K_3(t)$  для зон II и I (Рис. 4б), при этом конечные значения составили: для загрязнения маслом  $K_3 = 3,64\%$ , для загрязнения бензином  $K_3 = 4,55\%$ .

На втором этапе исследований по аналогичной программе выполнен эксперимент по диагностированию зоны искусственного загрязнения участка грунтового массива растворами серной кислоты  $H_2SO_4$  и последующему контролю процессов его электрообработки.

Схема опытной установки полностью аналогична Рис. 1, загрязнение зон опытного участка массива включало: насыщение 1%-ым раствором  $H_2SO_4$  без промывки водой (2 зоны); то же с промывкой водой (2 зоны); насыщение 1%-ым раствором  $H_2SO_4$  с последующей нейтрализацией 1%-ым раствором  $NaOH$  (1 зона); в одной зоне грунт оставался чистым (Таблица 1).

На Рис. 5 представлены наиболее существенные результаты в соответствии с целью работы.

Из результатов электрического зондирования по схемам ВЭЗ и ЭП (Рис. 5 а, б) следует, что при подготовке грунтового массива к искусственному загрязнению (бурении шпуров) произошло существенное разуплотнение грунтов, что привело к увеличению эффективного УЭС  $\rho_k$  до 40-55 Ом·м, при последующем насыщении грунта растворами  $H_2SO_4$  и  $NaOH$  уровень  $\rho_k$  на графиках ВЭЗ и ЭП резко снизился до 5-25 Ом·м. Таким образом, зона загрязнения по глубине соответствует интервалу АВ = 6-21 м ( $h = 0,6 - 2,1$  м) и по ширине интервалу х = -1 – 3 м, что в целом соответствует реальным размерам участка искусственного загрязнения неорганическими токсикантами.

В межэлектродном пространстве при электрообработке преобладающими являются: на начальном этапе ( $t = 24$  ч) – осмотическое перемещение раствора кислоты (щелочи) от катода к аноду и повышение концентрации ионов вследствие электролитического разложения воды; при последующей обработке ( $t > 24$  ч) при прогреве массива преобладающим становится его осушение с потерей влаги, что приводит к росту УЭС, особенно в приэлектродных зонах.

Исследование образцов грунта после электрообработки не показало заметных изменений его гранулометрического состава, а уменьшение влажности составило 15-25%.

#### Основные результаты и выводы

Результаты выполненных натуральных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Зоны загрязнения приповерхностных слоев песчано-глинистых грунтов электрически контрастными нефтепродуктами (маслами, бензинами и др.) и растворами неорганических соединений (кислот, щелочей) уверенно диагностируются по результатам вертикальных электрических зондирований и электропрофилирования соответственно по положительным и отрицательным аномалиями эффективного УЭС.

2. Непрерывный мониторинг при электрообработке процессов осмотического переноса загрязненной поровой жидкости с возможностью ее последующей откачки, осушения грунта и коагуляции нефтяных компонентов с преобразованием их в нерастворимое твердое, менее токсичное состояние обеспечивается по изменению УЭС путем установки в межэлектродном пространстве микрозондов или интегрально с использованием в качестве измерительных электродов-инъекторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухонослова А. Н., Бурлака В. А., Быков Д. Е. [и др.] Очистка почв от нефтяного загрязнения и оценка ее эффективности // Экология и промышленность России. 2009. № 10. С. 18–20.
2. Коржов Ю. В., Лапшина Е. Д., Хорошев Д. И. [и др.] Cleansoil – перспективный метод очистки нефтезагрязненных почв под существующей инфраструктурой // Сибирский экологический жур-нал. 2010. № 3. С. 419–428.
3. Арчегова И. Б., Хабибуллина Ф. М., Шубаков А. А. Оптимизация очистки почвы и водных объектов от нефти с помощью биосорбентов // Сибирский экологический журнал. 2012. № 2. С. 769–776.
4. Журавлев А. П., Шаяхмедов Р. И. Рекультивация нефтешламов и замазученных грунтов различной степени загрязнения без существенных капита-

ловложений, затрат и загрязнения окружающей среды // Экологический Вестник России. 2016. № 2. С. 21–23.

5. Королев В. А. К методике определения параметров массопереноса и электрокинетических явлений в грунтах на основе термодинамики необратимых процессов // Инженерная геология. Том 15. № 4. 2020. С. 20–28.

6. Королев В. А., Нестеров Д. С. Физико-химические закономерности изменения электрических зарядов частиц глинистых грунтов // Инженерная геология. № 4. 2017. С. 50–60.

7. Нестеров Д. С., Королев В. А. Изменение физико-химических особенностей глинистых грунтов при электроосмосе // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ): материалы Международной научно-практич. конф. Том 2. НПП «Фильтроткани». 2018.

8. Darmawan S.-I Wada. Effect of clay mineralogy on the feasibility of electrokinetic soil decontamination technology // Journal applied clay science. 2002. Vol. 20. Issue 6. Pp. 283–293.

9. Elektorowicz M., Cook F., Rassam D. Impact of pH and redox potential changes on acidic sulphate soils // Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. 2002. 254 p.

10. 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.

11. Zhi-Jia Xue, Chang-Gen Yan, Wu-Gang Li. Coupling of electrochemical-temperature-mechanical processes in marine clay during electro-osmotic consolidation // Journal scientific reports. 2020. Pp. 81–82.

12. Liaki C., Rogers C. D. F., Boardman D. I. Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes // Journal Appl Electro-chem. 2010.

13. Ефремова В. А., Кондакова Л. В., Дабах Е. В. Химико-биологическая оценка состояния городских почв // Сибирский экологический журнал. 2013. № 5. С. 741–750.

14. Середин В. В., Ядзинская М. Р. Исследование механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. 2014. №8–6. С. 1408–1412.

15. Караблин М. М., Простов С. М. Диагностирование оползнеопасных зон прибортового массива разреза «Ангренский» по данным сейсмо- и электроразведки // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 48–59.

16. Калайгорода В. В., Простов С. М., Смирнов Н. А. Локация очага эндогенного пожара в борту угольного разреза методом электроразведки // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 124–135.

17. 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 (171). С. 101-108. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-101-108, EDN: ARNWHT

18. 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: HOMXCZ

19. Шабанов Е. А., Сирота Д. Ю., Простов С. М., Вахьянов Е. М. Диагностика зон загрязнения электроконтрастными экотоксикантами путем профилирования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 6 (148). С. 48–56.

© 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: bushuevaa@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

### TESTING AN ELECTROPHYSICAL METHOD FOR DIAGNOSING POLLUTION ZONES AND MONITORING THEIR ELECTRICAL TREATMENT PROCESSES IN FIELD CONDITIONS

Sergey M. Prostov, Evgeniy A. Shabanov,  
Alexander A. Bushuev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\* for correspondence: bushuevaa@kuzstu.ru



#### Article info

Received:

01 April 2025

Accepted for publication:

15 January 2026

Accepted:

12 February 2026

Published:

19 March 2026

**Keywords:** Pollution, petroleum products, acid, alkali, electrical resistance, probing, microprobe.

#### Abstract.

The prospects of the electrophysical method for diagnostics of the zone artificially contaminated with oil products or acid (alkali) solutions have been substantiated and an experimental verification of its efficiency has been performed in natural conditions at a special testing ground using the electrical sounding method, as well as for monitoring the processes of electrical treatment of the contaminated zone using a microprobe system. It has been established that the zones of contamination of the surface layers of sandy-clayey soils with electrically contrasting oil products (oils, gasolines, etc.) and solutions of inorganic compounds (acids, alkalis) are reliably diagnosed based on the results of vertical electrical soundings and electrical profiling, respectively, based on positive and negative anomalies of the effective specific electrical resistance (SER). Continuous monitoring of the processes of osmotic transfer of contaminated pore fluid during electrical treatment with the possibility of its subsequent pumping out, soil drying and coagulation of oil components with their transformation into an insoluble solid, less toxic state is ensured by changes in electrical resistivity by installing microprobes in the interelectrode space or integrally using injector electrodes as measuring electrodes. At the pilot plant under natural conditions during electrical treatment of soil artificially contaminated with oil products with a contamination coefficient of  $K_{z0} = 7\%$ , the processes of coagulation of the oil base and changes in the granulometric composition of soils were recorded by variations in the effective electrical resistivity, while the final values were: for oil contamination  $K_3 = 3,64\%$ , for gasoline contamination  $K_3 = 4,55\%$ . In the interelectrode space during electrical treatment of the acid contaminated zone, the following are predominant: at the initial stage, osmotic movement of the acid solution from the cathode to the anode and an increase in the concentration of ions due to the electrolytic decomposition of water; During subsequent processing, when the mass is heated, its drying with loss of moisture becomes predominant, which leads to an increase in the resistivity, especially in the near-electrode zones.

**For citation:** Prostov S.M., Shabanov E.A., Bushuev A.A. Testing an electrophysical method for diagnosing pollution zones and monitoring their electrical treatment processes in field conditions. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 1(173):65-76. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-65-76, EDN: YWRMNP

#### REFERENCES

1. Sukhonosova A.N., Burlaka V.A., Bykov D.E. Cleaning of soils from oil pollution and assessment of its effectiveness. *Ecology and industry of Russia*. 2009; 10:18–20. (in Russ.)

2. Korzhov Yu.V., Lapshina E.D., Khoroshev D.I. Cleansoil – a promising method for cleaning oil-contaminated soils under existing infrastructure. *Sibe-rian Ecological Journal*. 2010; 3:419–428. (in Russ., abstract in Eng.)

3. Arcehgova I. B., Khabibullina F.M., Shubakov A.A. Optimization of cleaning of soil and water bodies from oil using biosorbents. *Siberian Ecological Journal*. 2012; 2:769–776. (in Russ., abstract in Eng.)
4. Zhuravlev A.P., Shayakhmedov R.I. Reclamation of oil sludge and oil-contaminated soils of varying degrees of pollution without significant capital investment, costs and environmental pollution. *Ecological Bulletin of Russia*. 2016; 2:21–23. (in Russ.)
5. 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.)
6. Korolev V.A., Nesterov D.S. Physicochemical regularities of changes in electric charges of clay soil particles. *Engineering geology*. 2017; 4:50–60. (in Russ., abstract in Eng.)
7. Nesterov D.S., Korolev V.A. Changes in the physical and chemical properties of clay soils during electro-osmosis. Strategy for the development of geological exploration of the subsoil: present and future (to the 100th anniversary of MGRI-RGGRU): materials of the International scientific and practical conference. Vol. 2. NPP «Filtrotkany». (in Russ.)
8. 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.)
9. Elektorowicz M., Cook F., Rassam D. Impact of pH and redox potential changes on acidic sulphate soils. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. 2002. 254 p. (in Eng.)
10. Gustav Loch, Ana Teresa Lima, Pieter J. Kleingeld. Geochemical effects of electro-osmosis in clays. *Journal of applied electrochemistry*. 2010; 40(6):1240–1254. (in Eng.)
11. Zhi-Jia Xue, Chang-Gen Yan & Wu-Gang Li. Coupling of electrochemical-temperature-mechanical processes in marine clay during electro-osmotic consolidation. *Journal scientific reports*. 2020. Pp. 81–82. (in Eng.)
12. Liaki C., Rogers C.D.F., Boardman D.I. Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes. *Journal Appl Electro-chem*. 2010. (in Eng.)
13. Efremova V.A., Kondakova L.V., Dabakh E.V. Chemical and biological assessment of the state of urban soils. *Siberian Ecological Journal*. 2013; 5:741–750. (in Russ., abstract in Eng.)
14. Seredin V.V., Yadzinskaya M.R. Study of the mechanism of particle aggregation in clay soils contaminated with hydrocarbons. *Fundamental research*. 2014; 8(6):1408–1412. (in Russ., abstract in Eng.)
15. Karablin M.M., Prostov S.M. Diagnosis of land-slide-hazardous zones of the edge massif of the An-grensky open-pit mine based on seismic and electrical exploration data. *News of universities. Mining magazine*. 2020; 1:48–59. (in Russ., abstract in Eng.)
16. Kalaigoroda V.V., Prostov S.M., Smimov N.A. Location of the source of endogenous fire in the side of a coal mine using electrical exploration. *News of universities. Mining magazine*. 2024; 4:124–135. (in Russ., abstract in Eng.)
17. Prostov S.M., Shabanov E.A., Bushuev A.A. Experimental and analytical justification of the method of continuous remote monitoring of soil pollution processes. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta=Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025; 5(171):101-108. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-101-108, EDN: ARNWHT
18. 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
19. Shabanov E.A., Sirota D.Yu., Prostov S.M., Vahyanov E. M. Diagnosis of contamination zones with electrically contrasting ecotoxicants by profiling. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta=Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021; 6(148):48–56.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

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 Vesennyyaya, 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 Vesennyyaya, 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 Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: bushuevaa@kuzstu.ru.

#### Contribution of the authors:

Sergey V. Puchkov – research problem statement, reviewing the relevant literature, conducting quantum chemical calculations, data analysis, drawing the conclusions, writing a text.

Yulia V. Nepomnyashchikh – reviewing the relevant literature, conducting quantum chemical calculations, data analysis, drawing the conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

