

УДК 504.064: 550.837.3: 550.84.02

**НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА КОНТРОЛИРУЕМОЙ  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГРУНТА ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ.  
Ч.III. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗОНЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ****IN SITU TESTING OF THE METHOD OF CONTROLLED ELECTROCHEMICAL  
CLEANING OF SOIL FROM OIL SPILLS.****Ch.III. ELECTRICAL AND PHYSICAL MONITORING OF THE POLLUTION  
ZONE****Шабанов Евгений Анатольевич,**  
аспирант, e-mail: evgenshab@mail.ru**Shabanov Evgeniy A.,** postgraduate**Простов Сергей Михайлович,**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: psm.kem@mail.ru

**Prostov Sergey M.,** Dr. Sc., ProfessorКузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya st., Kemerovo, 650000, Russia

**Аннотация.** Описаны методика проведения геофизического мониторинга для диагностирования зоны загрязнения. Изложены результаты геофизических исследований, полученных методами георадиолокации, электрического зондирования и профилирования. Экспериментально доказана эффективность электрохимической очистки малопроницаемых песчано-глинистых грунтов, обеспечивающего детализацию зоны скопления нефтепродуктов, интегральный прогноз изменения свойств грунта в процессе обработки, а в комплексе с ранее установленными корреляционными зависимостями – усредненную оценку изменения коэффициента загрязнения.

**Abstract.** The article describes the technique of geophysical monitoring for the diagnosis of the contamination zone. Presented are the results of geophysical investigations, obtained by means of GPR, electrical sounding and profiling. The efficiency of electrochemical cleaning of low permeability sandy-clayey soils was proved experimentally, providing details of area concentrations of petroleum products, integrated forecast of changes in soil properties during processing and in combination with the previously established correlation dependencies – the average assessment of changes in the rate of pollution.

**Ключевые слова:** Электрохимическая обработка, геофизический мониторинг, георадар, электрическое зондирование и профилирование, грунтовый массив, нефтепродукт, коэффициент загрязнения.

**Keywords:** Electrochemical treatment, geophysical monitoring, ground-penetrating radar, electrical sounding and profiling, soil, oil, contamination factor.

В настоящее время все более актуальными становятся вопросы экологии и природопользования. Большинство проблем, связанных с экологией возникают в результате промышленной деятельности человека. В Кузбассе одной из значимых отраслей промышленности являются добыча и переработка полезных ископаемых, а именно угля. Наряду с большим объемом промышленных отходов в виде отвалов вскрышных пород и необходимостью рекультивации нарушенных земель, одной из важных нерешенных экологических проблем угледобывающих предприятий, является загрязнение грунтов нефтепродуктами. Основные источники загрязнения – склады горюче-смазочных материалов, стационарные и передвижные АЗС, расположенные по всей площади предприятия [1–5].

Для обоснования наиболее эффективных параметров технологии очистки грунта от загрязнителя проводят оценку начального и остаточного загрязнения. Современные методики оценки содержания загрязняющего вещества в грунте могут быть весьма трудоемкими, зачастую связаны со значительными потерями времени, отводимого на подготовку и лабораторные испытания образцов грунта [6].

Физической основой электрофизического мониторинга является то, что нефть и все нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства, величина удельного электросопротивления (УЭС)  $\rho$  превышает  $10^7$  Ом·м. Комплекс электроповерхностных явлений в поровом пространстве грунтового массива как многофазной

среде, включающий твердую, жидкую и газовую компоненты, формируют зону нефтезагрязнения как зону, аномальную по электропроводности [7].

Для мониторинга процессов в подобных аномальных приповерхностных зонах вполне применимы классические методы электроразведки [8] и георадиолокации [9]. Значительный научный и методический задел в данном направлении получен при исследовании процессов напорной инъекции и электрохимического закрепления грунтов [10–12].

В КузГТУ уже несколько лет развивается технология контролируемой электрохимической очистки грунтов от нефтезагрязнений [13, 14], включающая обработку массива электрическим током с параллельным введением в электроды-инъекторы активного раствора. Проведены лабораторные исследования на образцах грунтов и нефтесодержащих веществ, одномерной и объемной установках с применением микродатчиков УЭС. Вместе с тем, полученные закономерности и диапазоны изменения физических свойств грунтов необходимо проверить и скорректировать в натуральных условиях для разработки практических рекомендаций по экологически безопасному ведению работ, с применением интегральных методов электрического зондирования.

Для электрофизического диагностирования зоны загрязнения, во время эксперимента, описанного в статье [15], был проведен комплекс мероприятий по определению размера и месторасположения зоны загрязнения. Для этого выполнено зондирование с поверхности по четырех элек-

тродной схеме и профилирование с помощью георадара «ОКО-2». Для реализации четырехэлектродного метода зондирования с поверхности земли в грунт забивали металлические питающие электроды, изготовленные из арматуры длиной 0,8 метра, диаметром 20 мм, заостренные с одной стороны. Для определения зоны загрязнения зондирование и профилирование были проведены до загрязнения на чистом грунтовом массиве и после его искусственного загрязнения нефтепродуктами. При интегральной схеме зондирования в качестве измерительных электродов использовали трубчатые электроды-инъекторы основной установки. Измерения проводили каротажным прибором КП-2. Георадиолокационное зондирование осуществлялось георадаром ОКО-2 с антенным блоком с центральной частотой  $f = 250$  МГц. Схема геофизических профилей включала один продольный (Пр. 4) и три поперечных профиля (Пр. 1-3) (рис. 1).

Результаты георадиолокации по поперечным профилям № 1–3 представлены в форме радарограмм (сверху – до загрязнения грунта, снизу – после). Сопоставление верхних и нижних радарограмм показывает, что контур 2 границы зоны загрязнения соответствует участку радарограммы с ослабленными горизонтальными линиями сифазности 1 (профили № 1 и № 2). На профиле № 3 аномалии не зафиксированы. Размеры аномальных зон по радарограммам: по ширине 2–2,4 м; по глубине 1,5–1,8 м. Данные размеры в целом соответствуют ширине зоны искусственно загрязненного массива, так как именно на такую ширину

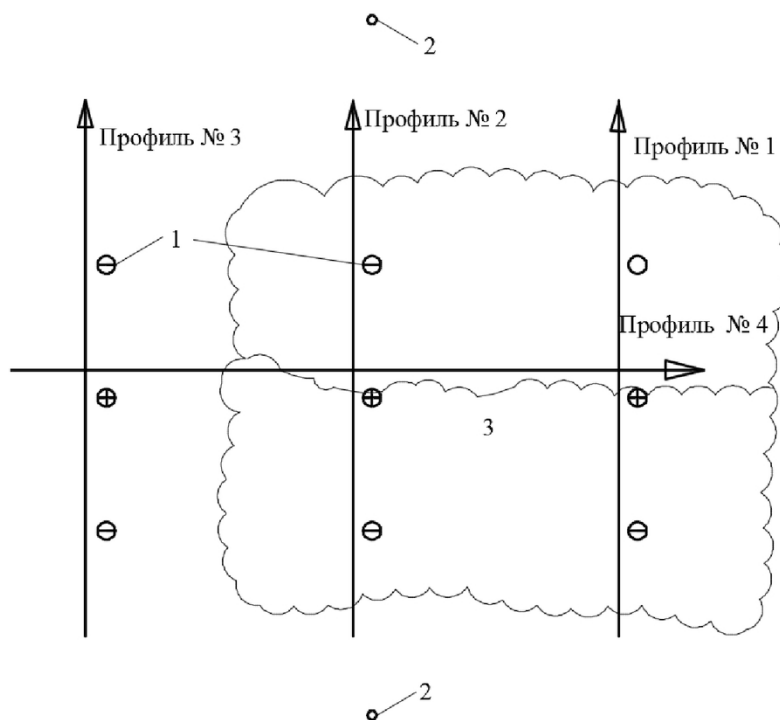


Рис. 1. Схема геофизических профилей:

1 – Электроды-инъекторы; 2 – заземляющие и питающие электроды; 3 – зона нефтезагрязнения

производилось искусственное загрязнение. По глубине грунтовый массив загрязняли через отверстия на глубину до 700 мм, при этом дальнейшее распространение в массив происходило самоотемом по порам грунта. После проведения эксперимента массив грунта был послойно извлечен, и при этом фиксировалось состояние массива, подробно полученные результаты были описаны в работах [15, 16]. При этом глубина до которой присутствовали нефтепродукты, составляла до 1,5 м, что также соответствует результатам геофизического определения зоны загрязнения при помощи георадара.

Параллельно с георадиолокацией проводилось электрическое зондирование по классической и интегральной схемам. На рис. 3 приведены результаты вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП) с ша-

гом  $\Delta x = 1$  м. Зона загрязнения нефтепродуктами диагностирована по локальным положительным аномалиям эффективного УЭС  $\rho_k$ . По графикам ЭП (рис. 3, а) интервал этой зоны составил  $x = -4-0$  м, по графикам ВЭЗ (рис. 3, б) интервал глубин  $h = 1-2,4$  м. После электрообработки зафиксировано уменьшение размеров и смещение этих зон на интервалы  $x = -1-1$  м и  $z = 0,5-1,3$  м. Определенные расхождения в результатах мониторинга методами георадиолокации и электрического зондирования вызваны их различной физической основой, частотой электрического поля и разрешающей способностью.

Для определения интегральных количественных показателей состояния грунтового массива проведены измерения эффективного УЭС  $\rho_k$  массива в межэлектродном пространстве между соседними электродами-инъекторами (см. рис. 1).

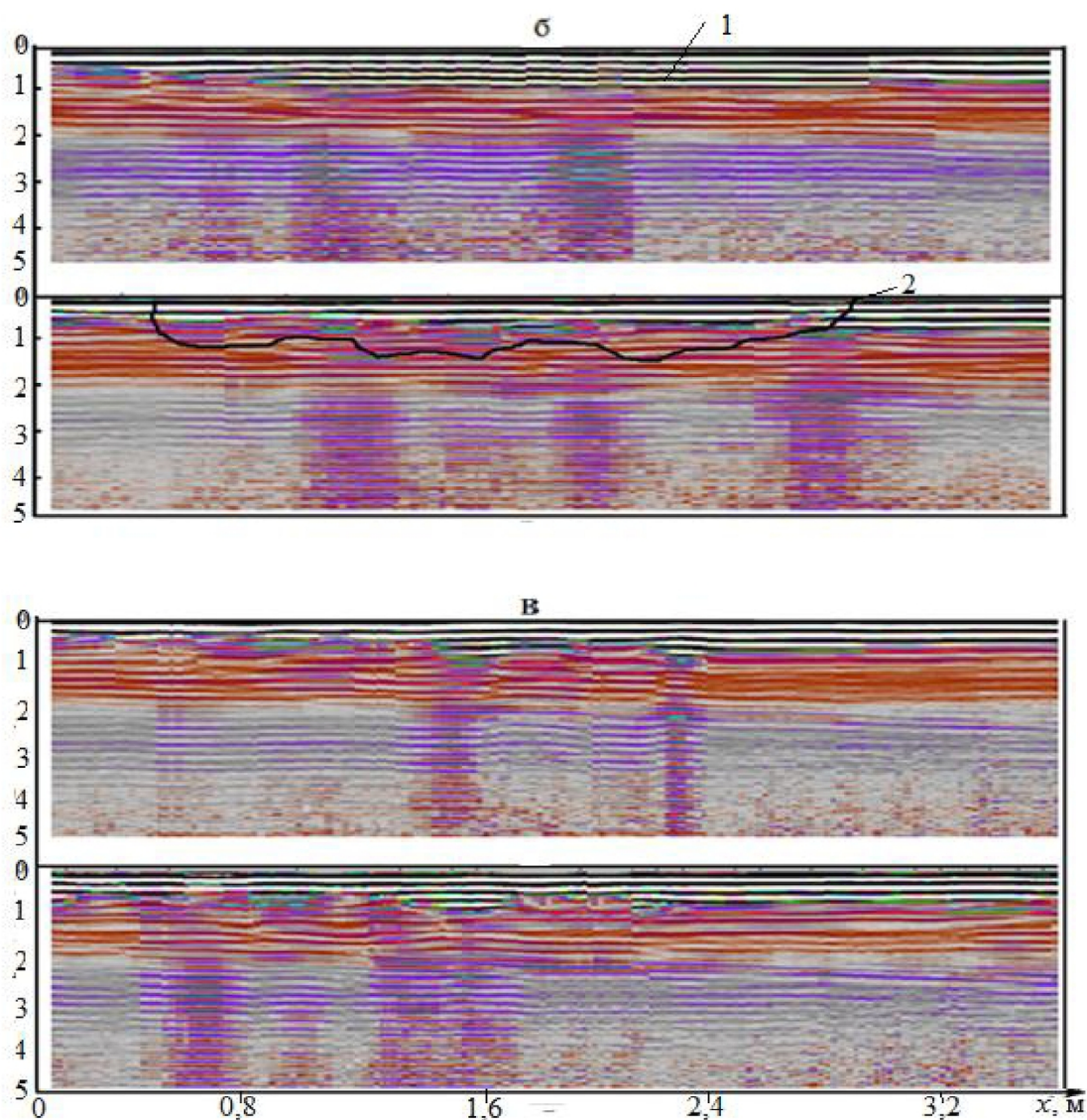


Рис. 2. Радарограмма до (сверху) и после загрязнения грунта по профилям № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в): 1 – линия сиэфзности; 2 – граница зоны загрязнения

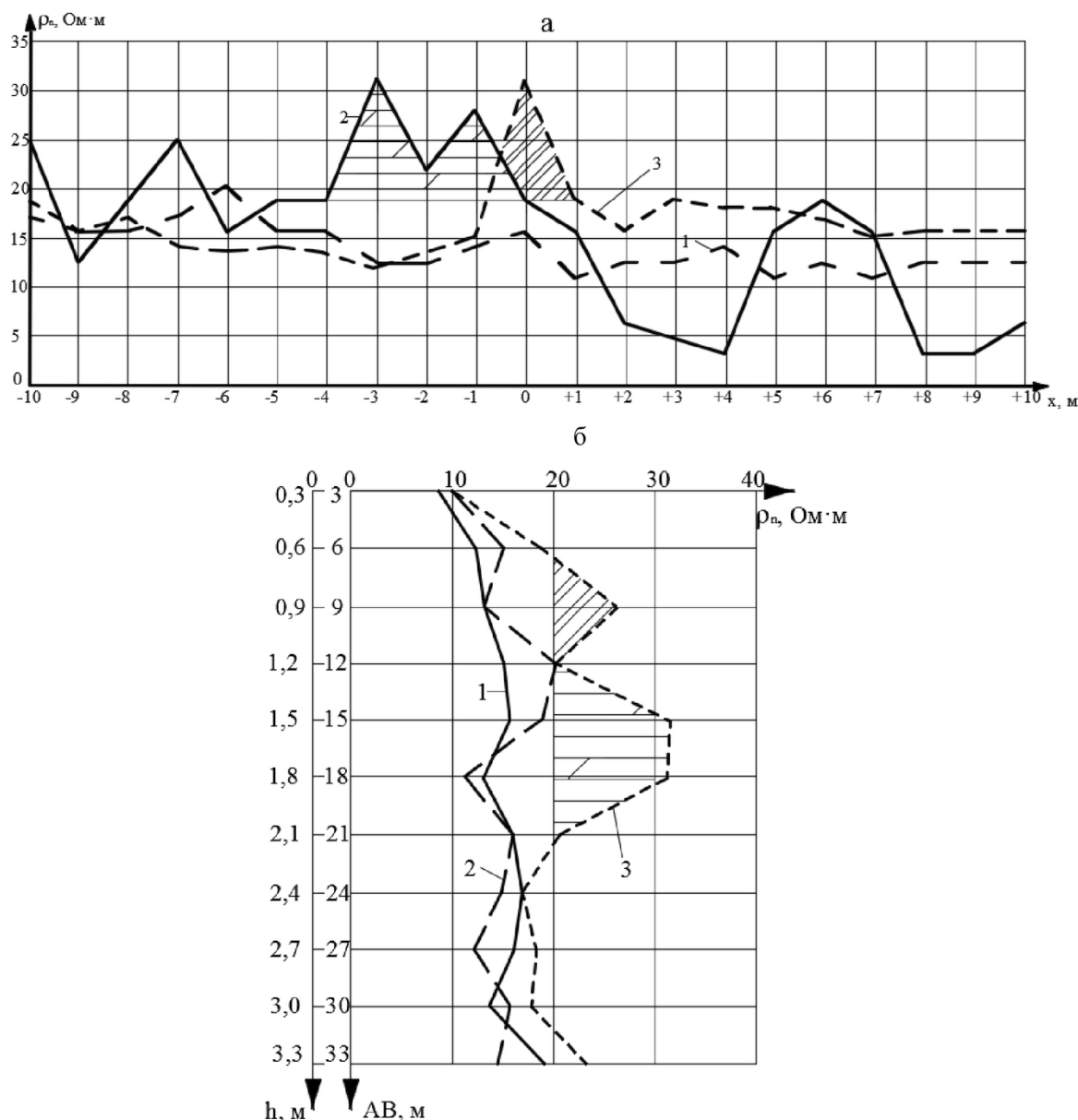


Рис. 3. Результаты электропрофилирования (а) и зондирования (б) по оси установки (Пр. № 4) с шагом 1 м: 1 – до загрязнения; 2 – после загрязнения; 3 – после электрообработки; 4 – расположение аномальной зоны до обработки; 5 – расположение аномальной зоны после обработки

На рис. 4 приведены графики изменения относительных значений  $\rho_k / \rho_{k0}$  от времени  $t$  в процессе электрообработки. Из графиков следует, что на интервале  $t = 48-72$  ч происходит закономерное снижение УЭС в 205 раз при всех схемах обработки, обусловленное изменением структурных параметров грунтов (пористости и гранулометрического состава), в дальнейшем на всех графиках наблюдается монотонное повышение уровня  $\rho_k$ , связанное с общим снижением влажности. Следует отметить, что при использовании растворителя (графики 4 и 5), разжижающего нефтепродукт в

порах, динамика описанных процессов значительно менее выражена, поскольку при этом усиливается электроосмотический эффект и снижается термокоагуляционный эффект электрообработки.

Для перехода к численным значениям коэффициента загрязнения были использованы ранее полученные при обработке данных лабораторных исследований четыре расчетные зависимости: линейная, логарифмическая, параболическая и экспоненциальная. Постоянные  $a_1-a_4$  определены при известном начальном коэффициенте загрязнения  $k_{z0} = 7\%$  равном отношению объема загрязнителя к объему загрязненного грунта. По уравнениям,

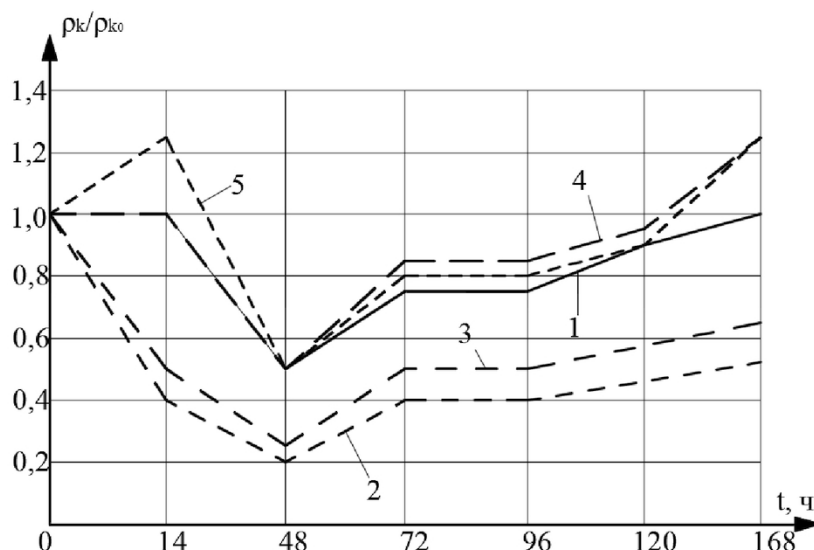


Рис. 4. График изменения во времени  $t$  относительного эффективного электросопротивления при электрическом зондировании:

1 – чистый глинистый массив; 2 – загрязненный отработанным маслом массив; 3 – загрязненный бензином массив; 4 – загрязненный отработанным маслом массив с обработкой растворителем; 5 – загрязненный бензином массив с обработкой растворителем

Таблица 1. Зависимость коэффициента загрязнения  $k_3$  от относительного изменения эффективного электросопротивления грунта в образце

Уравнение	Значение постоянной $a$ при загрязнении		Значение $k_3$		
	маслом	бензином	начальное $k_{30}, \%$	конечное $k_{3к}, \%$	
				масло	бензин
$k = a_1 \cdot \frac{\rho_k}{\rho_{k0}}$	$a_1=2,8$	$a_1=3,5$	7	3,64	4,55
$k = a_2 \cdot \ln\left(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)$	$a_2=7,64$	$a_2=10,1$		2	2,65
$k = a_3 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)^2$	$a_3=1,12$	$a_3=1,75$		1,9	2,96
$k = a_4 \cdot \exp\left(\frac{\rho_k}{\rho_{k0}}\right)$	$a_4=0,575$	$a_4=0,95$		2,11	3,49

приведенным в таблице 1 был найден коэффициент загрязнения  $k_3$  в каждый момент времени замера эффективного УЭС.

На рис. 5 представлено изменение коэффициента загрязнения (концентрации нефтепродукта) во времени. Из графиков следует, что коэффициент загрязнения  $k_3$  с течением времени уменьшается до момента  $t = 48-72$  ч, а затем стабилизируется. Момент стабилизации расчетного значения  $k_3$  является объективным критерием прекращения электрообработки поскольку дальнейшее воздействие на массив не дает существенного положительного эффекта.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. Георадиолокация и электрическое зондирование с земной поверхности обеспечивают диагностирование расположения и размеров зоны нефтезагрязнения с точностью до 0,1–0,5 м.

2. Электрическое зондирование обеспечивает интегральный контроль изменения свойств грунта в процессе обработки, а в комплексе с ранее установленными корреляционными зависимостями – усредненную оценку изменения коэффициента загрязнения. Установлено, что через 48–72 ч после начала обработки эффективное УЭС массива ста-

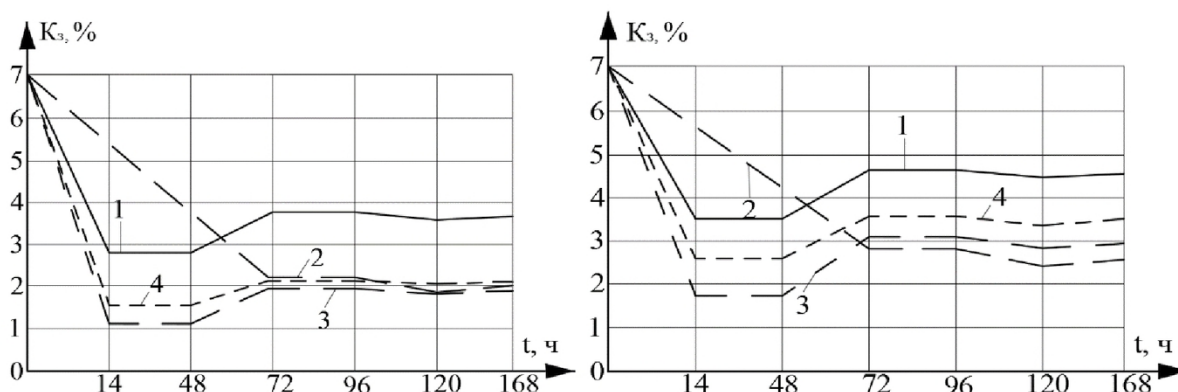


Рис. 5. Графики изменения концентрации отработанного масла (а) и бензина (б) при электрообработке в зависимости от времени  $t$ :

1 – линейная зависимость; 2 – логарифмическая зависимость; 3 – параболическая зависимость; 4 – экспоненциальная зависимость.

билизируется, и дальнейшее воздействие становится малоэффективным. По данным электрофизического контроля в результате эксперимента степень загрязнения массива отработанным маслом снизилась с начальных 7 % до 2–3,6 %, а при загрязнении бензином – с 7 % до 2,6–4,5 %. До-

полнительное разбавление вязких нефтепродуктов введением в электроды растворителя в диапазоне коэффициента загрязнения до 7 % не приводит к заметному положительному эффекту.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Из предварительного отчета о состоянии окружающей среды Кемеровской области за 2004 год // ЭКО-бюллетень ИпЭКА. – № 3 (110). – 2005. – С. 12–13.
2. Хорошилова, Л. С. Геоэкологическое состояние угледобывающих регионов Кузбасса. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. – 135 с.
3. Ивановкина, О. В. Приоритетные неорганические загрязнители в промышленных отходах Кемеровской области в ОАО «Западно Сибирский Испытательный центр», г Новокузнецк // ЭКО-бюллетень ИпЭКА. – № 2 (115). – 2006. – С. 32–33.
4. Каченов, В. И. К вопросу о влиянии нефтяных загрязнений на свойства грунтов / В. И. Каченов, В. В. Середин, С. В. Карманов // Геология и полезные ископаемые западного Урала / Пермский государственный национальный исследовательский университет. – 2011. – № 11. – С. 164–165.
5. Королев, В. А. Проблемы очистки геологической среды от загрязнений / В. А. Королев, М. А. Некрасова, С. Л. Полищук, Д. В. Доброва // Тр. ежегодн. научн. конференции «Ломоносовские чтения». – Москва, МГУ. – 1997. – С. 130–131.
6. Ахметзянова, Л. Г. Применение методов статистического анализа для определения безопасного содержания нефтепродуктов в серой почве / Л. Г. Ахметзянова, А. А. Савельев, С. Ю. Селивановская // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 777–783.
7. Королев, В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. – Москва: ООО «Сам полиграфист». – 2015. – С. 468.
8. Жданов, М. С. Электроразведка. – Москва: Недра. – 1986. – 316 с.
9. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации / С. В. Изюмов, С. В. Дружинин, А. С. Вознесенский. – Москва: Горная книга, МГТУ, 2008. – 196 с.
10. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С. М. Простов, В. А. Хмяляйнен, М. В. Гуцал, С. П. Бахаева. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2005. – 127 с.
11. Простов, С. М. Электромагнитный геоконтроль процессов укрепления грунтов / С. М. Простов, О. В. Герасимов, Е. А. Мальцев. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007. – 211 с.
12. Простов, С. М. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов / С. М. Простов, О. В. Герасимов, Н. Ю. Никулин. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2015. – 344 с.
13. 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.
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 Sym-

posium "Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety". Advances in Engineering Research. September (2016). Volume 92. pp. 175–183.

15. 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.

16. 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.

## REFERENCES

1. Iz predvaritel'nogo otcheta o sostoyanii okruzhayushchej sredy Kemerovskoj oblasti za 2004 god // ЕНКО-буллетен' ІрЕНКА. – # 3 (110). – 2005. – pp. 12-13.

2. Horoshilova, L. S. Geoekologicheskoe sostoyanie ugledobyvayushchih regi-onov Kuzbassa. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2007. – 135 p.

3. Ivanykina, O. V. Prioritetnye neorganicheskie zagryazniteli v promyshlennyh othodah Kemerovskoj oblasti v ОАО «Zapadno Sibirskij Ispytatel'nyj centr», g Novokuzneck // ЕНКО-буллетен' ІрЕНКА. – # 2 (115). – 2006. – pp. 32–33.

4. Kachenov V.I. K voprosu o vliyaniі neftyanyh zagryaznenij na svojstva gruntov / V.I. Kachenov, V.V. Seredin, S.V. Karmanov // Geologiya i poleznye iskopaemye zapadnogo Urala / Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet. – 2011. – # 11. – pp. 164–165.

5. Korolev V.A. Problemy ochistki geologicheskoy sredy ot zagryaznenij / V.A. Korolev, M.A. Nekrasova, S.L. Polishchuk, D.V. Dobrova // Tr. ezhegodn. nauchn. konferencii «Lomonosovskie chteniya». – M., MGU. – 1997. – pp.130–131.

6. Ahmetzyanova L. G. Primenenie metodov statisticheskogo analiza dlya opredeleniya bezopasnogo sodержaniya nefteproduktov v seroj pochve / L. G. Ahmetzyanova, A. A. Savel'ev, S. YU. Selivanovskaya // Sibirskij ehkologicheskij zhurnal. – 2014. – # 6. – pp. 777–783.

7. Korolev V. A. Teoriya ehlektropoverhnostnyh yavlenij v gruntah i ih primenenie. – Moskva: ООО «Sam poligrafist». – 2015. – pp.468.

8. Zhdanov M. S. EHlektorazvedka. – M: Nedra. – 1986. – 316 pp.

9. Izyumov S. V. Teoriya i metody georadiolokacii / S.V. Izyumov, S.V. Druzhinin, A.S. Voznesenskij. – Moskva: Gornaya kniga, - MGU, 2008. – 196 pp.

10. Prostop S. M. Geoelektricheskij kontrol' zon ukrepleniya glinistyh gornyh porod / S.M. Prostop, V.A. Hyamyalyajnen, M.V. Gucal, S.P. Bahaeva. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 2005. – 127 pp.

11. Prostop S. M. EHlektromagnitnyj geokontrol' processov ukrepleniya gruntov / S.M. Prostop, O.V. Gerasimov, E.A. Mal'cev. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 2007 – 211 p.

12. Prostop S. M. Kompleksnyj geologo-geofizicheskij monitoring processov uprochneniya gruntov / S.M. Prostop, O.V. Gerasimov, N.Yu. Nikulin. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 2015. – 344 pp.

13. Shabanov, E.A. Issledovanie fizicheskikh svojstv gruntov pri ehlektroosmoticheskoy obrabotke / E.A. Shabanov, S.M. Prostop, M.V. Gucal // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2015. – # 1(107). – pp. 3–7.

14. Evgeniy Shabanov, Sergey Prostop. 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. pp. 175–183.

15. Shabanov, E.A. Naturnye ispytaniya metoda kontroliruemoj ehlektrohimicheskoy ochistki grunta ot neftezagryaznenij. Ch.I. Izmenenie fizicheskikh svojstv gruntovogo massiva / E.A. Shabanov, S.M. Prostop // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – # 6 (118). – pp. 35–43.

16. Shabanov, E.A. Naturnye ispytaniya metoda kontroliruemoj ehlektrohimicheskoy ochistki grunta ot neftezagryaznenij. Ch.II. Ehlektrofizicheskij kontrol' / E.A. Shabanov, S.M. Prostop // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – # 6 (118). – pp. 44–50.

*Поступило в редакцию 19.04.2017*

*Received 19 April 2017*