

ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-48-56

УДК 624.131.4:502.55

ДИАГНОСТИКА ЗОН ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТРАСТНЫМИ ЭКОТОКСИКАНТАМИ ПУТЕМ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Шабанов Евгений Анатольевич,

канд. техн. наук, доцент, shabanovea@kuzstu.ru

Сирота Дмитрий Юрьевич,

канд. техн. наук, доцент, sdy.pm@kuzstu.ru

Простов Сергей Михайлович,

доктор техн. наук, профессор, psm.tigm@kuzstu.ru

Вахьянов Евгений Романович,

ст. преподаватель, vem.ad@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



Информация о статье

Поступила:

22 октября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

05 декабря 2021 г.

Ключевые слова:

экоотоксиканты,
дезактивация, однородные,
расчетные, данные.

Аннотация.

В статье рассматривается метод диагностирования зон загрязнения грунтов электрически контрастными экоотоксикантами, а также способы мониторинга процессов дезактивации грунтов геофизическими способами. Проведен расчет и моделирование зоны загрязнения грунтов при диагностировании методами электроразведки. По схемам зондирования и профилирования. В работе решена прямая и обратная задача электроразведки с зоной загрязнения в виде шара внутри однородного грунтового массива, при этом были установлены основные расчетные зависимости, которые с наибольшей точностью описывают полученные экспериментальным путем данные. Предлагаемый в работе алгоритм, основанный на адаптивном методе случайного поиска, позволяет по результатам электрических профилирований оперативно определять зону загрязнения электрически контрастными экоотоксикантами: глубину расположения; эффективный радиус и оценивать степень загрязнения по соотношению удельных электросопротивлений аномальной зоны и вмещающей среды.

Для цитирования: Шабанов Е.А., Сирота Д.Ю., Простов С.М., Вахьянов Е.Р. Диагностика зон загрязнения электроконтрастными экоотоксикантами путем профилирования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 6 (148). – С. 48-56 – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-48-56

Введение

В настоящее время экология и охрана окружающей среды является самой актуальной проблемой современности [1-3]. Со временем в связи с увеличением населения и развитием промышленности возрастает нагрузка на окружающую среду и происходит накопление загрязнителей в воде, грунте и атмосфере. Данное накопление является отрицательным явлением и может приводить к причинению вреда жизни и здоровью граждан. При этом загрязнение атмосферы и воды приводит непосредственно к вреду

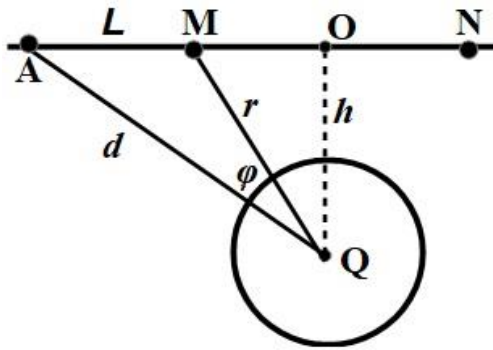


Рис. 1. Расчетная схема
 Fig. 1. Calculation scheme,



Рис. 2. Алгоритм решения обратной задачи
 Fig. 2. Algorithm for solving the inverse problem

Рассмотрим решение прямой задачи электроразведки для данного случая: в однородном изотропном полупространстве с УЭС ρ_1 , на некоторой глубине h расположен проводящий шар радиуса a с УЭС ρ_2 . На земной поверхности располагается трёхэлектродная установка AMN (электрод В находится в бесконечности): где А – питающий электрод, а MN – электроды измерения перепада напряжения. Расстояние от центра шара Q до точки А – d , м; а до точки измерения потенциала М – r , м; полуудлина установки – L , м (рис. 1).

флоре, фауне и человеку, а загрязнение грунтов в долгосрочной перспективе приводит к негативным последствиям для растений, животных и человека.

Разработка методов мониторинга окружающей среды - это одно из перспективных направлений в науке [4-6], которое позволит более оперативно и точно определять степень и локацию загрязнения, что положительно сказывается на состоянии окружающей среды. Для мониторинга грунтов используются прямые способы, которые подразумевают извлечение образцов грунта и их исследование в лабораторных условиях, что является трудоемким процессом [7-8]. В данной ситуации актуальным является развитие косвенных бесконтактных и бесскважинных способов контроля, таких как геофизические методы [9-10], которые позволяют проводить электроразведку и профилирование оперативно определять зону загрязнения. Данные методы применимы для электрически контрастных загрязнителей, которые обладают аномально высоким или низким электросопротивлением по сравнению с природным водным раствором, заполняющим поровое пространство грунта. К электрически контрастным экотоксикантам относятся нефтепродукты, растворы кислот и щелочей [11-12]. За счет данного свойства они легко и точно диагностируются в грунте, а замеры истинного удельного электросопротивления позволяют с помощью ранее разработанного алгоритма количественно определить степень загрязнения грунта нефтепродуктами [13]. В КузГТУ были выполнены разработки метода оперативного мониторинга загрязнения и очистки грунтов от нефтепродуктов, подробно описанные в работах [14-15].

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма, основанного на адаптивном методе случайного поиска, позволяющего по данными электрических профилирований оперативно определять зону загрязнения электрически контрастными экотоксикантами.

Методы исследований

В большинстве случаев зона загрязнения может быть аппроксимирована сферическим включением с аномальным удельным электросопротивлением (УЭС).

Зададим полярную систему координат $r = r(\varphi)$ с началом координат в центре шара Q и полярной осью AQ . В такой системе координат уравнение Лапласа для потенциала u будет иметь вид (1) – (4):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) = 0. \quad (1)$$

Решения уравнения вне шара $u_e = \frac{I\rho_1}{4\pi L} + u_1(r, \varphi)$ и внутри шара $u_i = \frac{I\rho_1}{4\pi L} + u_2(r, \varphi)$ должны удовлетворять граничным условиям вида:

$$\frac{\partial u_1(a, \varphi)}{\partial r} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\partial u_2(a, \varphi)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$u_1(a, \varphi) = u_2(a, \varphi),$$

$$u_1(\infty, \varphi) = 0$$

Общим решением уравнения (1) с учётом условий (2) будет выражение вида:

$$u_e = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{L} + 2 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{K_j a^{2j+1}}{d^{j+1} r^{j+1}} P_j(\cos \varphi) \right], \quad (3)$$

где $K_j = \frac{j(q-1)}{(j+1)q+1}$ – коэффициент отражения; $q = \frac{\rho_2}{\rho_1}$; $P_j(\cos \varphi)$ – многочлены Лежандра.

Определяя напряжённость E через производную $\frac{\partial u_e}{\partial L}$ и применяя формулу расчёта эффективного УЭС $\rho_k = \frac{E}{I} 2\pi L^2$ получим формулу вида:

$$\rho_k = \rho_1 \left[1 + 2L \sum_{j=1}^{\infty} \frac{K_j a^{2j+1} (j+1)}{d^{j+1} r^{j+2}} \{r P_j(\cos \varphi) - d P_{j+1}(\cos \varphi)\} \right], \quad (4)$$

где взаимосвязи между расстояниями d , r , полярным углом φ и координатами точек x_A , x_M относительно проекции центра шара определяются формулами вида:

$$r^2 = x_M^2 + h^2,$$

$$d^2 = x_A^2 + h^2,$$

$$\cos \varphi = \frac{r^2 + d^2 - L^2}{2rd}, \quad (5)$$

$$x_A = x_M - L.$$

Из формулы (4) можно получить выражение для эффективного УЭС в полупространстве, вмещающем шар, который находится в однородном электрическом поле, порождённом бесконечно удалённым электродом, в прямоугольных координатах:

$$\rho_k = \rho_1 \left[\frac{2K_1 a^3 (h^2 - 2x_M^2)}{(h^2 + x_M^2)^{5/2}} \right] \quad (6)$$

Перейдем к решению обратной задачи.

Предположим, что на поверхности земли произведено электропрофилирование, в результате чего получено распределение эффективного УЭС, график которого позволяет сделать предположение о наличии некоторой объёмной аномалии в нижней части полупространства. Требуется установить значения следующих трёх параметров: глубины залегания шара – h , м; радиус шара – a , м; величину отношения УЭС шара и вмещающей его среды – q . В качестве исходной информации будем использовать значения

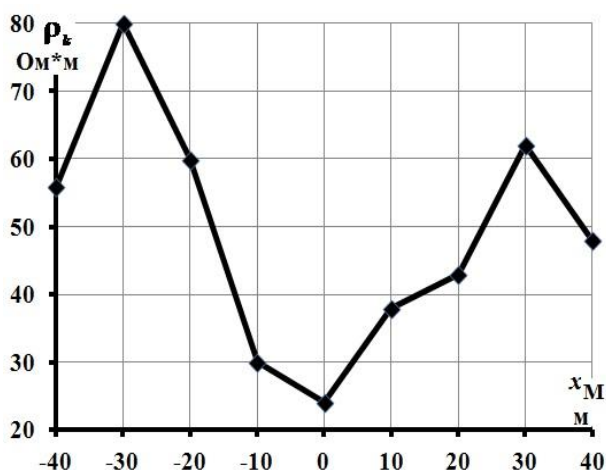


Рис. 3. Результаты электропрофилеирования на участке 1
 Fig. 3. Results of electrical profiling at site 1

Таблица 1. Возможные значения радиусов и отношений УЭС
 Table 1. Possible values of UES radii and ratios

AM, м	15	25	35	45
a, м	21,6	24,5	24,5	24,5
q	0,32	0,61	0,49	0,44

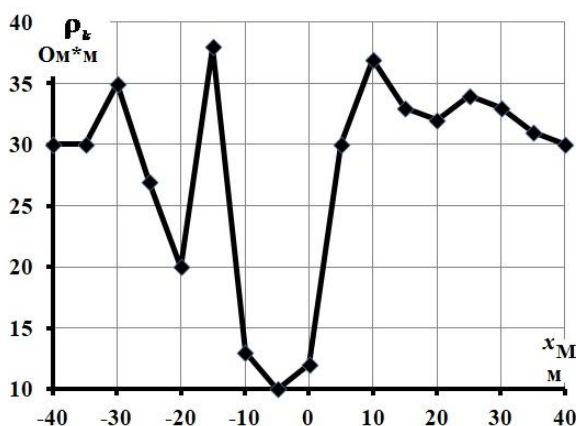


Рис. 4. Результаты электропрофилеирования на участке 2 (профиль № 1)
 Fig. 4. Results of electrical profiling at site 2 (profile № 1)

ρ_k^j в трёх экстремальных точках кривой (левой, центральной, правой). Таким образом, требуется решить систему из трёх нелинейных уравнений с тремя неизвестными следующего вида:

$$\rho_k^j = \rho(a, h, q, x_M^j), \quad (7)$$

где $x_M^j, j = 1, 2, 3$ – координаты точек измерения КУЭС; ρ_k^j – измеренные в этих точках КУЭС.

Для уменьшения количества определяемых переменных воспользуемся выражением (6). Найдём от него производную и приравняем её к нулю:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial x_M} = \frac{2\rho_1 K_1 a^3 (6x_M^3 - 9x_M h^2)}{(h^2 + x_M^2)^{7/2}} = 0.$$

Видно, что координаты экстремальных точек определяются только глубиной залегания центра шара. Тогда оценочная величина для глубины залегания шара определится по формуле:

$$h = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M. \quad (8)$$

Так как экспериментальная кривая электропрофилирования может не обладать симметрией, то в качестве ориентировочной глубины можно взять среднее арифметическое глубин, рассчитанных по левой и правой экстремальным точкам.

Таким образом, требуется подобрать только два параметра: радиус шара – $a \in (0; h)$, м, а также величину отношения УЭС шара и вмещающей его среды – $q \geq 0$. Алгоритм действий при определении требуемых параметров представлен на рис. 2.

Решать переопределённую систему из трёх уравнений (7) будем с помощью метода наименьших квадратов. Составим соответствующую целевую функцию с очевидными ограничениями на переменные вида $a, h, q > 0; h > a$:

$$\Phi(a, q) = \sum_{j=1}^3 [\rho_k^j - \rho(a, h, q, x_M^j)]^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Анализ поверхности функции (9) при различных глубинах h и полудлине установки L показывает, что эта функция является унимодальной с овражной структурой. Для поиска её минимума можно использовать адаптивный метод случайного поиска (5). Преимущество этого метода заключается в отсутствии необходимости вычислять частные производные целевой функции, а также уверенное движение по дну оврага в сторону экстремальной точки.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим ряд случаев по реализации методики определения требуемых параметров. Экспериментальные данные были получены при геоэлектрическом контроле зон укрепления глинистых горных пород.

Результаты электропрофилирования над обводненной зоной выгоревшего угля пл.4 Внутренний на Южно-Абинском участке «Подземгаз» (рис. 3).

$\rho_1 = 56, \rho_k^1 = 80, \rho_k^2 = 24, \rho_k^3 = 62$ Ом·м; $x_M^1 = -30, x_M^2 = 0, x_M^3 = 30$ м – экстремальные значения результатов электропрофилирования над обводнённой зоной [6].

Так как координата правой экстремальной точки равна $x_M = 30$, то ориентировочная глубина залегания:

$$h = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M = 10\sqrt{6} \approx 24,5 \text{ м.}$$

Так как неизвестно, с таким разном проводились измерения, то составим таблицу 1 возможных значений радиусов и отношений УЭС для различных полуразносов AM .

Следует отметить, что при увеличении полуразноса установки AM (т. е. при стремлении AM к бесконечности) радиус предполагаемого шара достигает своего возможного максимума ($a_{max} = h$), а отношение УЭС стремится к нулю ($q \rightarrow 0$). Таким образом, предполагаемый радиус шара располагается в интервале $a \in [21; 22]$ м, а отношение УЭС в интервале $a \in [0,3; 0,4]$.

Результаты электропрофилирования над обводненной зоной перемычки гидроотвала № 3 разреза «Кедровский» (рис. 4): $\rho_1 = 30, \rho_k^1 = 38, \rho_k^2 = 10, \rho_k^3 = 38$ Ом·м; $x_M^1 = -15, x_M^2 = 0, x_M^3 = 13$ м – экстремальные значения результатов электропрофилирования над обводнённой зоной.

Так как координаты левой и правой экстремальных точек расположены не симметрично относительно центра, то область с аномальным сопротивлением только приближённо может считаться шаром. В качестве ориентировочной глубины залегания центра области будем считать среднее арифметическое, рассчитанное по левой точке $x_M = 15$, для которой глубина залегания $h_1 = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M \approx 12,3$ м и правой точке $x_M = 13$, для которой $h_2 = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M \approx 10,6$ м.

Таким образом, ориентировочная глубина залегания $h = 11,45$ м. Данные значения электропрофилирования были получены при полуразносе $AM = 30$ м. Результаты решения обратной задачи показывают, что радиус аномалии $a \approx 8,36$ м, а отношение УЭС вмещающего пространства и аномальной области $q \approx 0,0056$, что говорит о более высокой проводимости аномальной зоны $\rho_2 = q \cdot \rho_1 = 0,224$ Ом·м.

На этом же опытном участке по профилю № 2 получены следующие результаты:

$$\rho_1 = 50, \rho_k^1 = 50, \rho_k^2 = 65, \rho_k^3 = 45 \quad \text{Ом·м}; \quad x_M^1 = -20, x_M^2 = 0, x_M^3 = 25 \text{ м (рис. 5).}$$

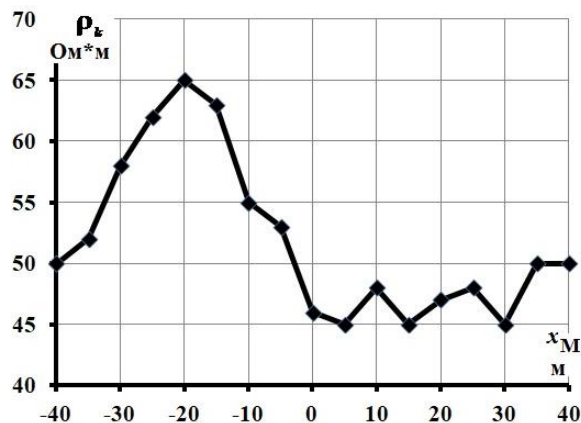


Рис. 5. Результаты электропрофилирования на участке 2 (профиль № 1)
 Fig. 5. Results of electrical profiling at site 2 (profile № 1)

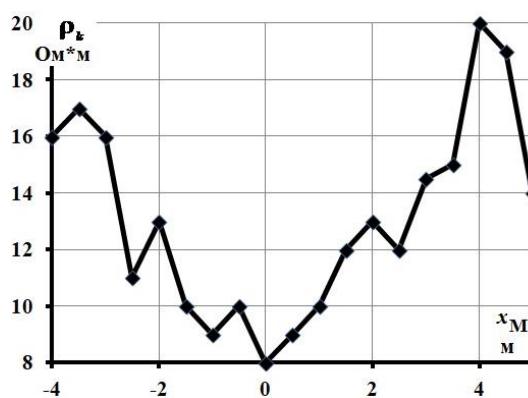


Рис. 6. Результаты электропрофилирования на участке 3
 Fig. 6. Results of electrical profiling at site 3

Координаты левой и правой экстремальных точек расположены не симметрично относительно центра. В качестве ориентировочной глубины залегания центра области будем считать среднее арифметическое, рассчитанное по левой точке $x_M = 20$, для которой глубина залегания $h_1 = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M \approx 16,3$ м и правой точке $x_M = 25$, для которой $h_2 = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M \approx 20,4$ м. Таким образом, ориентировочная глубина залегания $h = 11,45$ м. Данные значения электропрофилирования также были получены при полуразносе $AM = 30$ м. Ориентировочные результаты решения обратной задачи показывают, что радиус аномалии $a \approx 18,35$ м, а отношение УЭС вмещающего пространства и аномальной области $q \approx 1,56$. Совпадение предполагаемого радиуса шара с глубиной залегания его центра указывает на то, что представленные данные не укладываются в используемую теоретическую схему. Например, первое экстремальное значение КУЭС должно располагаться левее, чем на графике, при этом значение его должно быть меньше $\rho_1 = 50$.

Результаты электропрофилирования над зоной инъекционного укрепления на геополигоне ООО «НООЦЕНТР» (рис. 6):

$\rho_1 = 16, \rho_k^1 = 17, \rho_k^2 = 8, \rho_k^3 = 20$ Ом*м; $x_M^1 = -3,8, x_M^2 = 0, x_M^3 = 4$ м – экстремальные значения результатов электропрофилирования над обводнённой зоной.

Координаты левой и правой экстремальных точек располагаются практически симметрично относительно центра экстремальной области. Тогда ориентировочная глубина залегания центра области по правой точке $x_M = 4$ будет равна $h = \frac{\sqrt{6}}{3} x_M \approx 3,26$ м. Данные значения электропрофилирования были получены при полуразносе $AM = 3$ м. Ориентировочные результаты решения обратной задачи показывают, что радиус аномалии $a \approx 3$ м, а отношение УЭС вмещающего пространства и аномальной области $q \approx 0,65$.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующий вывод:

- предлагаемый в работе алгоритм, основанный на адаптивном методе случайного поиска, позволяет по данным электрических профилированных оперативно определять зону загрязнения электрически контрастными экотоксикантами: глубину расположения; эффективный радиус и оценивать степень загрязнения по соотношению удельных электросопротивлений аномальной зоны и вмещающей среды.

Исследование проведено в рамках гранта МК-1212.2020.5 «Геолого-геофизический мониторинг процессов электрохимической очистки грунтовых оснований сооружений от нефтяных загрязнений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Semenova // E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering» (ERSME-2020), 04007
2. R. M. Usmanova, N. A. Sattarova, N. N. Boiko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020) 6th-9th October 2020, Russky Island, Russia, 062040.
3. V. Zakrutkin, G. Sklyarenko, E. Gibkov, O. Reshetnyak, A. Rodina // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference Proceedings. Sofia, pp. 87-94.
4. E. A. Lushchay, D. E. Ivanov, E. I. Tikhomirova // Povolzhskiy Journal of Ecology. # 4, pp. 458-469.
5. E. Loupian, V. Savorskiy, A. Kashnitskii, D. Kobets, K. Sen'Ko, I. Balashov, I. Uvarov // E3S Web of Conferences. Regional Problems of Earth Remote Sensing, RPERS 2019, 01002.
6. Q. Wu, H. Liu, S. Liu, Y. Zeng, M. Zhang, H. Zhao // Meitan Xuebao. T. 44. # 1, pp. 10-22.
7. W. M. Badawy, K. Ali, H. M. El-Samman, M. V. Frontasyeva, S. F. Gundorina, O. G. Dului // Physics of Particles and Nuclei Letters. T. 12. # 4, pp. 637-644.
8. M. Imchen, R. Kumavath, D. Barh, V. Avezedo, M. Viana, P. Ghosh, A. R. Wattam // Scientific Reports. T. 7. # 1, pp. 8859.
9. A. P. Chernov, A. V. Danilov, S. A. Vyzhva // 18th International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects», Geoinformatics 2019, 16344.
10. I. M. Hasanov, L. A. Muravyev // 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019, Gelendzhik 2019, pp. 733-742.
11. E. Kardasz, P. Kardasz, V. Pohrebennyk, A. Shybanova, N. Homko // 19th INTERNATIONAL SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SGEM 2019. Conference proceedings. pp. 193-202.
12. A. M. Gareev, R. G. Galimova // Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety, T. 6. # 1. pp. 390-397.
13. S. M. Prostov, M. B. Gucal, E. F. Shabanov // Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety. Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Prevention and Control, pp. 433-440.
14. S. Prostov, E. Shabanov // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, 02002.
15. S. Prostov, E. Shabanov // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium, 02007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-48-56

UDS 624.131.4:502.55

**DIAGNOSIS OF CONTAMINATION ZONES WITH
ELECTRICALLY CONTRASTING ECOTOXICANTS BY PROFILING**

Evgeniy A. Shabanov,
C. Sc. in Engineering,
Dmitriy Yu. Sirota,
C. Sc. in Engineering, Associate Professor
Sergey M. Prostov,
Dr. Sc. in Engineering, psm.tigm@kuzstu.ru
Evgeniy M. Vahyanov,
senior lecturer,

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000,
Russian Federation



Article info

Received:

22 October 2021

Revised:

30 November 2021

Accepted:

05 December 2021

Keywords: ecotoxicants,
decontamination, homogeneous,
calculated, data

Abstract.

The article discusses the method of diagnosing soil contamination zones with electrically contrasting ecotoxicants, as well as methods for monitoring the processes of soil decontamination by geophysical methods. The calculation and modeling of the soil contamination zone was carried out when diagnosing by electrical exploration methods. According to the schemes of probing and profiling. The paper solves the direct and inverse problem of electrical exploration with a contamination zone in the form of a ball inside a homogeneous soil mass, while the main calculated dependencies were established, which describe the data obtained experimentally with the greatest accuracy. The algorithm proposed in this paper, based on the adaptive random search method, allows using the results of electrical profiling to quickly determine the contamination zone with electrically contrasting ecotoxicants: the depth of the location; the effective radius and assess the degree of contamination by the ratio of the specific electrical resistances of the anomalous zone and the host medium.

For citation Shabanov E.A., Sirota D.Yu., Prostov S.M., Vahyanov E.M. Diagnosis of contamination zones with electrically contrasting ecotoxicants by profiling. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.6 (148), pp. 48-56. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-48-56

REFERENCES

1. G. Semenova // E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering» (ERSME-2020), 04007
2. R. M. Usmanova, N. A. Sattarova, N. N. Boiko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020) 6th-9th October 2020, Russky Island, Russia, 062040.
3. V. Zakrutkin, G. Sklyarenko, E. Gibkov, O. Reshetnyak, A. Rodina // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference Proceedings. Sofia, pp. 87-94.
4. E. A. Lushchay, D. E. Ivanov, E. I. Tikhomirova // Povolzhskiy Journal of Ecology. # 4, pp. 458-469.
5. E. Loupian, V. Savorskiy, A. Kashnitskii, D. Kobets, K. Sen'Ko, I. Balashov, I. Uvarov // E3S Web of Conferences. Regional Problems of Earth Remote Sensing, RPERS 2019, 01002.
6. Q. Wu, H. Liu, S. Liu, Y. Zeng, M. Zhang, H. Zhao // Meitan Xuebao. T. 44. # 1, pp. 10-22.
7. W. M. Badawy, K. Ali, H. M. El-Samman, M. V. Frontasyeva, S. F. Gundorina, O. G. Dului // Physics of Particles and Nuclei Letters. T. 12. # 4, pp. 637-644.
8. M. Imchen, R. Kumavath, D. Barh, V. Avezedo, M. Viana, P. Ghosh, A. R. Wattam // Scientific Reports. T. 7. # 1, pp. 8859.
9. A. P. Chernov, A. V. Danilov, S. A. Vyzhva // 18th International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects», Geoinformatics 2019, 16344.
10. I. M. Hasanov, L. A. Muravyev // 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019, Gelendzhik 2019, pp. 733-742.
11. E. Kardasz, P. Kardasz, V. Pohrebennyk, A. Shybanova, N. Homko // 19th INTERNATIONAL SCIENTIFIC GEOCONFERENCE SGEM 2019. Conference proceedings. pp. 193-202.

12. A. M. Gareev, R. G. Galimova // Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety, Т. 6. # 1. pp. 390-397.
13. S. M. Prostov, M. B. Gucal, E. F. Shabanov // Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety. Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Prevention and Control, pp. 433-440.
14. S. Prostov, E. Shabanov // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, 02002.
15. S. Prostov, E. Shabanov // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium, 02007.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).