

УДК 550.374

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.04>Я. Глоба^{1,3}, асп., заст. голов. геофізика,E-mail: globa_yaroslav@ukr.net;Р. Глоба^{2,3}, асп., геофізик з обробки даних,E-mail: hloba_roman@ukr.net;М. Рева³, канд. фіз.-мат. наук, доц.,E-mail: mvreva@gmail.com;С. Вижва³, д-р геол. наук, проф.,E-mail: vsa@univ.net.ua;¹Товариство з обмеженою відповідальністю "Ентерпрайз ЛТД"
пр. Оболонський, 54, оф. літера А, м. Київ, 04214, Україна²Товариство з обмеженою відповідальністю "Вікоіл ЛТД"
вул. Кудрявський узвіз, 7, оф. 211, м. Київ, 04053, Україна³Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ДЖЕРЕЛ ДИСКОВОГО ТИПУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук О.І. Меньшовим)

У результаті старіння шару захисної ізоляції підземних трубопроводів, яке відбувається під дією зовнішніх факторів, в ізоляційному захисному шарі можуть утворюватися місця, де ізоляція порушується настільки, що відбувається витік електричного струму під дією захисного потенціалу труби. Ці процеси призводять до зменшення захисного потенціалу підземних трубопроводів, а отже до погіршення захищеності підземних комунікацій. Такі місця пошкоджень фіксуються зйомкою розподілу електричного потенціалу "труба-земля" (U_{ms}) вздовж траси трубопроводу способом виносного електрода і вимірами "поперечного та поздовжнього градієнтів" електричного поля. Оскільки місця витіку електричного струму є джерелами електричних полів, то важливо знати особливості цих полів з метою оцінки ступеня і розмірів пошкоджень. З принципової точки зору це питання зводиться до розв'язку оберненої задачі електрометрії для полів, створюваних джерелами різної структури. У разі деталізації аномалій дані електрометричної зйомки бажано отримувати з точністю, яка дозволяє застосовувати для їхньої кількісної інтерпретації способи, що ґрунтуються на аналітичних співвідношеннях для аномалій цих параметрів. У даній роботі виконано аналіз можливостей використання для інтерпретації аномального поля, спричиненого джерелом витоку струму з пошкодження дискового типу, способів, застосовуваних для полів, створюваних точковими джерелами.

Ключові слова: точкове джерело, джерело дискового типу, потенціал, сила витіку струму.

Постановка проблеми. Метою обстеження стану електрохімічного захисту трубопроводів електрометричними методами є загальна оцінка захисного електричного потенціалу вздовж траси трубопроводу, що забезпечується станціями катодного захисту, та фіксація ділянок пошкоджень ізоляційного покриття підземних комунікацій. Такі місця пошкоджень фіксуються зйомкою розподілу електричного потенціалу "труба-земля" (U_{ms}) вздовж траси трубопроводу і так званих "поперечного та поздовжнього градієнтів" електричного поля, які являють собою різниці потенціалів ΔU_{MN} , вимірювані лінією MN з розміром 5–10 м, зорієнтованою поперек і вздовж траси трубопроводу. За наявності пошкоджень ізоляції під дією захисного потенціалу відбувається витік електричного струму із трубопроводу, у результаті чого утворюється аномальне електричне поле. Важливо не тільки зафіксувати місце пошкодження, але й оцінити його просторове положення та ступінь пошкодження за силою витіку струму. З принципової точки зору це завдання вирішується шляхом розв'язання оберненої задачі електрометрії, тобто шляхом інтерпретації зафіксованого аномального поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує низка публікацій, присвячених застосуванню методів електрометрії для визначення місць і ступеня пошкоджень в інженерних спорудах (Глоба Р. та ін., 2016, 2017; Глоба Я. та ін., 2017, 2019; Рева та ін., 2019; Калькутін та ін., 2012; Лукович, 2011). Більшість публікацій присвячена розгляду принципових питань електрохімічного захисту значних за розміром ділянок підземних комунікацій.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. У роботах, присвячених проблемам електрохімічного захисту підземних трубопроводів, мало уваги приділяється детальному дослідженню окремих локальних місць пошкодження ізоляційного покриття. Стаття присвячена аналізу електричного поля, створюваного дисковим витіком струму як одного із варіантів виду пошкодження ізоляційного покриття підземних трубопроводів, і розробці принципових основ інтерпретації аномального електричного поля з метою визначення

просторового положення пошкодження, його розмірів і сили витіку струму.

Мета досліджень. Аналіз поля дискового витіку струму і його інтерпретаційних можливостей щодо визначення глибини, сили витіку струму та розмірів джерела. Порівняльний аналіз електричних полів дискового та точкового джерел з метою встановлення умов їхньої збіжності, за яких можливе використання для визначення глибини до джерела та сили струму витіку більш простих алгоритмів поля точкового джерела.

Теорія. Інтерпретація просторового розподілу параметрів електричних полів (потенціалу та його поздовжнього й поперечного градієнтів) будь-якого джерела полягає у визначенні його просторового положення та розмірів. Для джерел дискового типу такими інтерпретаційними параметрами є положення його епіцентра, глибина розташування h та радіус r_0 . Що стосується визначення просторового положення епіцентра, то він визначається за характерними особливостями розподілу потенціалу електричного поля вздовж епіцентрального профілю, а саме – за точкою його екстремального значення, а також за точкою переходу через нуль графіка поздовжнього градієнта.

Електричне поле дискового джерела струму за своєю просторовою симетрією близьке до структури поля точкового джерела, принаймні на певних відстанях. Зважаючи на це, є сенс виконати порівнюваний аналіз полів цих двох джерел з точки зору оцінювання інтерпретаційних можливостей самих полів дискових витіків струму та можливостей застосування в процесі інтерпретації полів дискових джерел інтерпретаційних алгоритмів, застосовуваних для інтерпретації полів точкових джерел.

Нормальне електричне поле дискового джерела струму. Наведемо короткий опис розв'язку задачі про нормальне поле дискового джерела. Припустимо, що в однорідному просторі з питомим опором ρ розташований диск із радіусом r_0 , з поверхні якого стікає струм сили I (рис. 1). Припускаємо також, що поверхня диска є екіпотенціальною (ізоповерхнею). Необхідно знайти функцію

просторового розподілу потенціалу електричного поля U , створеного джерелом такого дискового типу.

Сформульовану задачу доречно розв'язувати в циліндричній системі координат (r, φ, z) з початком в центрі дискової поверхні (рис. 1), оскільки цій задачі властива осьова симетрія (незалежність потенціалу від азимутального кута φ). Розв'язання сформульованої задачі зводиться до визначення потенціалу електричного поля в довільній точці простору $M(r, \varphi, z)$.

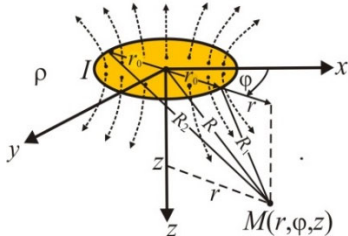


Рис. 1. Дискове джерело струму в однорідному просторі:
► – струмові лінії

Очевидно, що для функції просторового розподілу потенціалу електричного поля $U(r, z)$ повинні виконуватися три умови:

1) потенціальна функція U задовольняє осесиметричне рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0; \quad (1)$$

2) у зв'язку з тим, що в нескінченності потенціал електричного поля дискового витoku струму відповідає потенціалу поля точкового джерела, для функції U має виконуватися така крайова умова:

$$U(r, z)|_{R \rightarrow \infty} = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{R} = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{r^2+z^2}}; \quad (2)$$

3) з екіпотенціальності дискової поверхні витoku струму випливає третя умова:

$$U(r, z)|_{r=r_0}^{z=0} = \text{const}. \quad (3)$$

Загальним розв'язком осесиметричного рівняння Лапласа (1) є інтеграл Фурє-Бесселя виду

$$U(r, z) = \int_0^\infty B(m) e^{-m|z|} J_0(mr) dm, \quad (4)$$

де J_0 – функція Бесселя, $B(m)$ – невідома функція. Вибір функції $B(m)$ має бути таким, щоб інтеграл (4) задовольняв умови (2) і (3).

Серед інтегралів Фурє-Бесселя є такий інтеграл (Прудников А. П. і др., 1983):

$$IN = \int_0^\infty \frac{\sin(mr_0)}{m} e^{-m|z|} J_0(mr) dm = \arcsin \frac{2r_0}{\sqrt{(r+r_0)^2+z^2} + \sqrt{(r-r_0)^2+z^2}} \quad (5)$$

Його властивості повністю задовольняють умови (2) і (3), які мають виконуватися для шуканої потенціальної функції, а саме:

$$IN|_{R \rightarrow \infty} = \frac{r_0}{R} = \frac{r_0}{\sqrt{r^2+z^2}}; \quad IN|_{r < r_0}^{z=0} = \frac{\pi}{2} = \text{const}. \quad (6)$$

Отже цілком виправданим буде вибір загального розв'язку сформульованої вище задачі у вигляді

$$U(r, z) = C \int_0^\infty \frac{\sin(mr_0)}{m} e^{-m|z|} J_0(mr) dm = C \cdot \arcsin \frac{2r_0}{\sqrt{(r-r_0)^2+z^2} + \sqrt{(r+r_0)^2+z^2}},$$

де C – невідома стала. Ця стала просто визначається на основі крайової умови (2) з урахуванням властивості інтеграла (6) і має вигляд: $C = I\rho / (4\pi r_0)$.

У підсумку співвідношення для функції розподілу потенціалу електричного поля дискового джерела струму, розташованого в однорідному провідному просторі, запишеться так:

$$U(r, z) = \frac{I\rho}{4\pi r_0} \arcsin \frac{2r_0}{\sqrt{(r-r_0)^2+z^2} + \sqrt{(r+r_0)^2+z^2}}. \quad (7)$$

Розв'язуючи аналогічну задачу методом дзеркальних відображень для однорідного півпростору, на глибині h від поверхні якого розташований дисковий виток струму, приходимо до такого результату:

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r_0} \arcsin \frac{2r_0}{R_1+R_2} - 0, \quad (8)$$

де $R_1 = \sqrt{(r-r_0)^2+z^2}$, $R_2 = \sqrt{(r+r_0)^2+z^2}$.

Відповідно поздовжній (ΔU_x) і поперечний (ΔU_y) вимірювані приймальною лінією MN градієнти будуть мати вигляд:

$$\Delta U_x = \frac{\partial U}{\partial x} MN = -\frac{I\rho}{\pi} MN \cdot \frac{x}{r} \cdot \frac{(r+r_0)R_1 + (r-r_0)R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4r_0^2}}, \quad (9)$$

$$\Delta U_y = \frac{\partial U}{\partial y} MN = -\frac{I\rho}{\pi} MN \cdot \frac{y}{r} \cdot \frac{(r+r_0)R_1 + (r-r_0)R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4r_0^2}}. \quad (10)$$

Оскільки в подальшому в статті наводяться результати порівняльного аналізу поля дискового джерела з полем точкового джерела, отримані на основі відповідних розрахунків, то наведемо також співвідношення для потенціалу та поздовжнього й поперечного градієнти поля точкового джерела.

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r^2+h^2}}, \quad \Delta U_x = \frac{\partial U}{\partial x} MN = -\frac{I\rho}{2\pi} MN \frac{x}{(r^2+h^2)^{3/2}},$$

$$\Delta U_y = \frac{\partial U}{\partial y} MN = -\frac{I\rho}{2\pi} MN \frac{y}{(r^2+h^2)^{3/2}}. \quad (11)$$

Потенціал електричного поля дискового джерела. На рис. 2, а наведено графіки розподілу нормованих значень потенціалу електричного поля дискового джерела U/U_{0h} вздовж епіцентрального профілю для різних значень відношення радіуса диска r_0 до глибини його розташування h ($0 \leq r_0/h \leq 0,5$), а на рис. 2, б – графіки розбіжності цих нормованих значень потенціалу з такими ж нормованими значеннями потенціалу точкового джерела. За нормувальний параметр узято потенціал поля точкового джерела в епіцентрі, тобто на відстані h : $U_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h}$. Координати точок профілю прив'язані до точки епіцентра і також представлені в нормованому вигляді x/h .

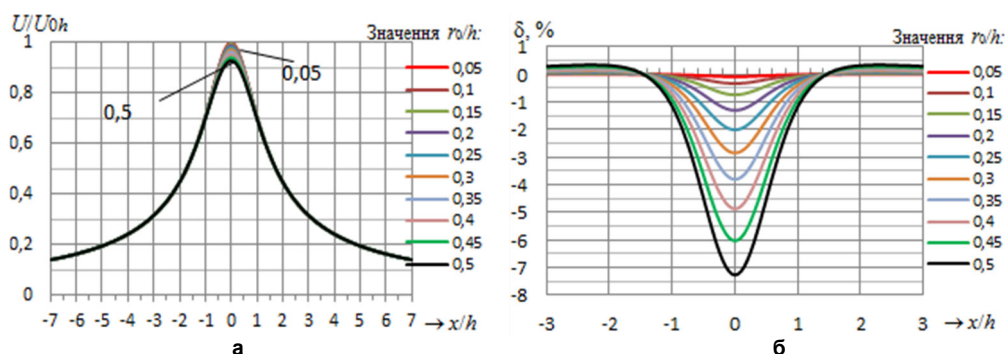


Рис. 2. Графіки розподілу потенціалу електричного поля дискового витoku струму (а) та його розбіжності з потенціалом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h

Наведені графіки показують, що потенціальна функція джерела дискового типу в межах зазначених відносних розмірів реальних локальних пошкоджень мало відрізняється від потенціальної функції поля точкового джерела. Так, розрахунки, на основі яких побудовані представлені залежності, свідчать, що на відстанях від епіцентра $x = h$ розбіжність потенціалів полів цих двох типів джерел становить $\delta < 1,16 \%$, а на відстанях $x = 1,2h - \delta < 0,5 \%$. Максимальна розбіжність характерна для епіцентральної точки і в разі $r_0/h = 0,5$ вона складає $7,3 \%$. Зрозуміло, що зі зменшенням розмірів дискового витoku струму зменшується розбіжність з полем точкового джерела. Навіть в епіцентральної точці ця розбіжність не така вже суттєва. Зокрема, при $r_0/h = 0,25$ (у разі $h = 2$ м, $r_0 = 0,5$ м, що є досить суттєвим за розміром локальним витокom струму) така розбіжність в епіцентральної точці становить 2% .

Відмічені особливості структури поля джерела дискового типу мають позитивну і негативну сторони. Позитивним є те, що суттєво спрощується визначення глибини h до витoku струму і сили самого струму I . Для цього можна застосувати в певному діапазоні відстаней від екстремуму потенціалу ($r > 1,3h$) алгоритми інтерпретації, застосовувані для поля точкового джерела. Щодо визначення розмірів витoku струму (площі пошкодження), то тут виникають складнощі. Розміри витoku струму найбільш суттєво впливають на структуру поля в околі епіцентральної точки. Зважаючи на відносно несуттєві

зміни аномалії потенціалу в околі епіцентра, практичне визначення розмірів джерела витoku струму проблематичне, хоча принципово можливе. Така інтерпретація зводиться до двох поступових кроків. 1. Визначається глибина h і сила витoku струму I з пошкодження на основі інтерпретації аномалії в інтервалі пікетів $r > 1,3h$, де можливе застосування відносно простих алгоритмів інтерпретації полів точкових джерел. 2. Розміри джерела витoku струму визначаються шляхом чисельного розв'язання трансцендентного рівняння

$$U(r)/U_{0h} = 2 \frac{h}{r_0} \arcsin \frac{2r_0/h}{\sqrt{1+(r/h-r_0/h)^2} + \sqrt{1+(r/h+r_0/h)^2}}, \quad (12)$$

де $U(r)$ – вимірний потенціал у точці, розташованій в околі епіцентра на відстані r від нього; $U_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h}$. Для визначення r_0/h можна також скористатися номограмою, представленою на рис. 3. Значення r_0/h відповідає числовому коду кривої, на яку потрапляє точка, абсциса якої дорівнює r/h , а ордината – $U(r)/U_{0h}$.

Принадібно зауважити, що завдання визначення розміру пошкодження досить тонка, вимагає ультрадетальних досліджень по точному визначенню епіцентра аномалії, а також в його околі, бажано на відстанях $r = (0,2 \pm 0,6)h$, що не завжди на практиці може бути реалізовано. На більших відстанях завдання може мати лише оціночний характер, оскільки знижується ступінь його коректності й однозначності, а також роздільна здатність номограми.

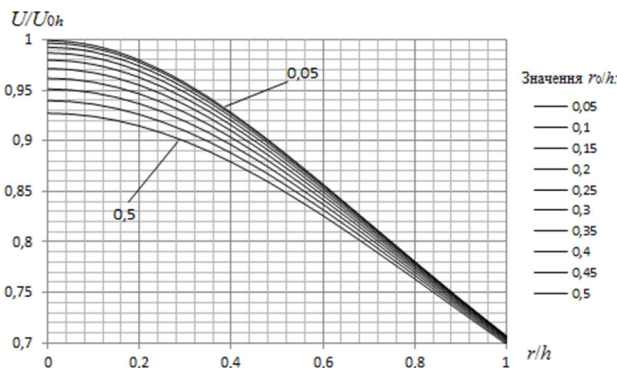
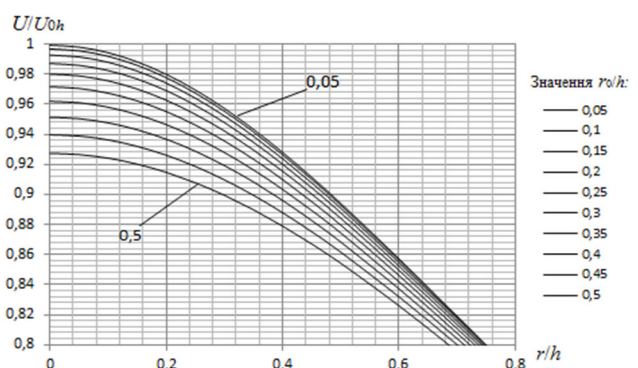


Рис. 3. Номограма для визначення відносних розмірів джерел витoku струму дискового типу



Поздовжній градієнт. На рис. 4, а наведені графіки розподілу нормованих значень поздовжнього градієнта електричного поля дискового джерела E_x/E_{0h} вздовж епіцентрального профілю для різних значень відношення радіуса диска до глибини його розташування h ($0 \leq r_0/h \leq 0,5$), а на рис. 4, б – графіки розбіжності цих нормованих значень поздовжнього градієнта з такими ж нормованими значеннями поздовжнього градієнта точкового джерела. За нормувальний параметр прийнята поздовжня напруженість поля точкового джерела, розташованого на поверхні півпростору з питомим опором ρ , на відстані h від нього: $E_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h^2}$.

Відповідні розрахунки, відображені графічно на рис. 4, свідчать про те, що цей параметр є більш чутливим до зміни розмірів дискового джерела порівняно з потенціальною функцією. Те, що в околі точки перетину графіком нульової лінії наявні відносно суттєві розбіжності з поздовжнім градієнтом поля точкового джерела є зрозумілим фактом – це пов'язано з малими амплітудними значеннями даної характеристики поля в околі "нуля".

В околі екстремумів порівняно з потенціалом поля поздовжній градієнт є більш чутливим до зміни розмірів диска. Для прикладу, максимальна розбіжність потенціалів електричних полів дискового і точкового джерел у разі $r_0/h=0,3$ становить $2,8 \%$, а при $r_0/h = 0,25 - 2 \%$, то

на відносному віддаленні від епіцентра $r/h \approx 0,8$, який наближений до координат екстремумів поздовжнього градієнта, розбіжності для цього параметра поля становить значення відповідно $5,6 \%$ і 4% , тобто у два рази розбіжність поздовжніх градієнтів, яка пов'язана з розмірами джерел дискового типу, вища порівняно з потенціальною характеристикою поля. Отже, і можливість визначення розмірів джерела поля за результатом аналізу поздовжнього градієнта є більш перспективною.

Можливість визначення розмірів джерела дискового типу може бути реалізована на основі амплітудного аналізу екстремальних значень поздовжнього градієнта, або координат (відстаней) екстремумів відносно точки епіцентра. Рис. 5 свідчить, що в околі екстремумів наявна залежність як амплітуди екстремуму поздовжнього градієнта, так і його просторової координати, від відносних розмірів радіуса джерела r_0/h . У результаті виконаного чисельного аналізу, результати якого представлені в табл. 1, та на рис. 6, встановлено практично аналітичні залежності координат екстремальних точок поздовжнього градієнта r_{max}/h і його екстремальних відносних значень $e_{max} = (E_x/E_{0h})_{max}$ з відносним радіусом r_0/h (рис. 6):

$$r_{max}/h = 0,58012(r_0/h)^2 + 0,0308(r_0/h) + 0,7086; \quad R^2 = 0,9996; \quad (13)$$

$$e_{max} = 0,21(r_0/h)^3 - 0,3583(r_0/h)^2 + 0,0063(r_0/h) + 0,3848 \quad R^2_{max} = 1. \quad (14)$$

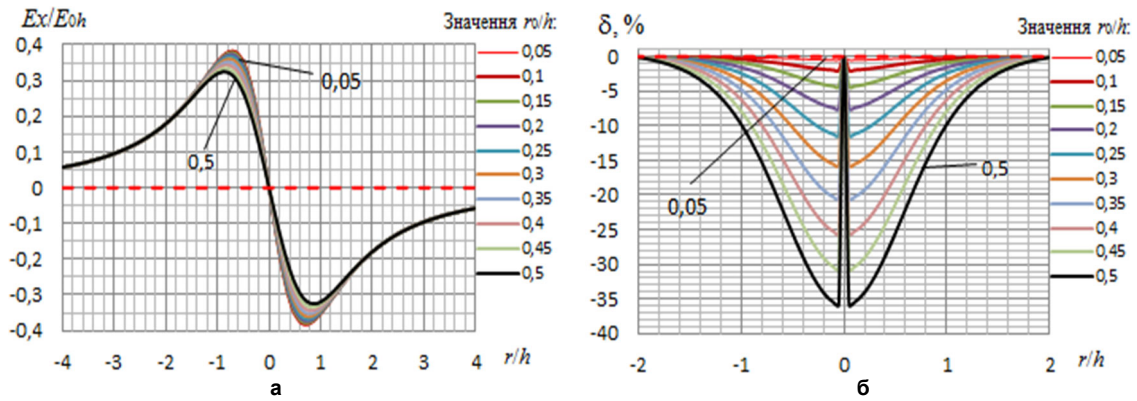


Рис. 4. Графіки поздовжнього градієнта електричного поля дискового витку струму (а) та його розбіжності з поздовжнім градієнтом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h

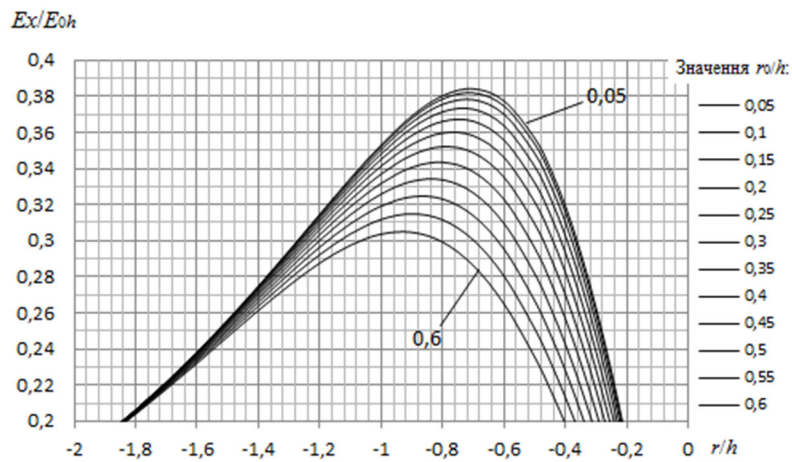


Рис. 5. Графіки поздовжнього градієнта електричного поля дискового витку струму в околі екстремуму для різних значень радіуса джерела

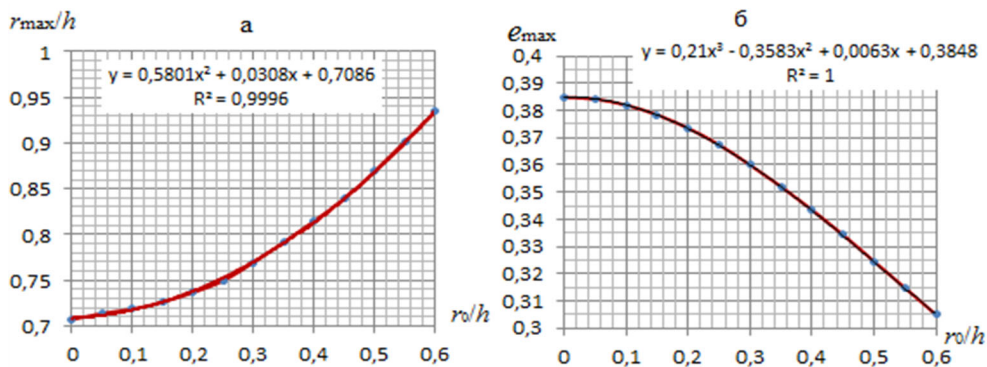


Рис. 6. Графіки залежностей координат екстремумів поздовжнього градієнта електричного поля (а) та його відносних екстремальних значень (б) від відносних розмірів r_0/h дискового джерела

Залежність координат екстремумів поздовжнього градієнта електричного поля та його відносних екстремальних значень від відносних розмірів дискового джерела

Таблиця 1

№	r_0/h	r_{max}/h	$(E_x/E_{0h})_{max}$
1	0,00	0,3849002	0,3849002
2	0,05	0,3842165	0,3842165
3	0,10	0,3820221	0,3820221
4	0,15	0,3784298	0,3784298
5	0,20	0,3735304	0,3735304
6	0,25	0,3674396	0,3674396
7	0,30	0,3600118	0,3600118
8	0,35	0,3520989	0,3520989
9	0,40	0,3435011	0,3435011
10	0,45	0,3343500	0,3343500
11	0,50	0,3245891	0,3245891
12	0,55	0,3148649	0,3148649
13	0,60	0,3050178	0,3050178

Інтерпретація аномалії поздовжнього градієнта для визначення розмірів джерела полягає в такому: 1. За результатом детальної зйомки потенціалу електричного поля і його поздовжнього градієнта визначається точка епіцентра джерела. 2. За результатом інтерпретації графіка потенціалу визначають глибину h і силу витоку струму I (безперечно за відомого питомого опору ρ середовища, який визначається за даними профілювання чи зондування). 3. За координатами екстремумів поздовжнього градієнта визначають відносний розмір джерела

$$|E_{x,max}| = \frac{I\rho}{\pi h^2} \cdot \frac{(r_{max}/h+r_0/h)^2 R_1 + (r_{max}/h-r_0/h)^2 R_2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4(r_0/h)^2}}, \quad (15)$$

де $R_1 = \sqrt{1 + (r_{max}/h - r_0/h)^2}$, $R_2 = \sqrt{1 + (r_{max}/h + r_0/h)^2}$, r_{max} – відстань від епіцентра джерела до екстремуму.

Звідси струм визначається за формулою

$$I = \pi h^2 \frac{|E_{x,max}|}{\rho} \left\{ \left[\frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4(r_0/h)^2}}{(\sqrt{1 + (r_{max}/h + r_0/h)^2} R_1 + \sqrt{1 + (r_{max}/h - r_0/h)^2} R_2)} \right] \right\}. \quad (16)$$

Поперечний градієнт. Поперечний градієнт вимірюється вздовж профілю, паралельному радіальному профілю, що перетинає епіцентр джерела. При цьому відстані у цього профілю від епіцентрального можуть бути різними.

На рис. 7 і 8 наведено графіки розподілу нормованих значень поперечного градієнта електричного поля дискового джерела $e_y = E_y/E_{0h}$ та їхніх розбіжностей з відповідною характеристикою поля точкового джерела вздовж двох профілів, паралельних епіцентральному, для різних значень відносного розміру радіуса диска r_0/h ($0 \leq r_0/h \leq 0,5$). Профілі, уздовж яких розраховані графіки поперечного градієнта, розташовані на різних відносних відстанях від епіцентрального профілю, а саме: $y/h=1$

r_0/h , використовуючи кореляційний зв'язок (2) або номограму на рис. 6, а. Визначити r_0/h можна також за амплітудними значеннями екстремумів (хоча це менш надійно). Для цього необхідно виконати їхнє нормування по $E_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h^2}$, після чого скористатися кореляційним зв'язком (3) або номограмою на рис. 6, б.

За амплітудними значеннями екстремумів поздовжнього градієнта можна також проконтролювати визначення сили струму витоку I , виходячи з рівняння

$$E_{0h} = \frac{I\rho}{2\pi h^2}.$$

(рис. 7) і $y/h=0,5$ (рис. 8). За нормувальний параметр, як і в разі з поздовжнім градієнтом, узятя напруженість поля точкового джерела, розташованого на поверхні півпростору з питомим опором ρ , на відстані h :

Розрахунки та їхня візуалізація на зазначених рисунках свідчать, що максимальна розбіжність поперечних градієнтів електричних полів порівнюваних джерел, так само як і потенціалів, спостерігається тоді, коли відстань точки вимірювання поперечного градієнта до епіцентра джерела мінімальна, тобто в системі координат з початком в епіцентрі це відповідає нульовій координаті x ($x=0$).

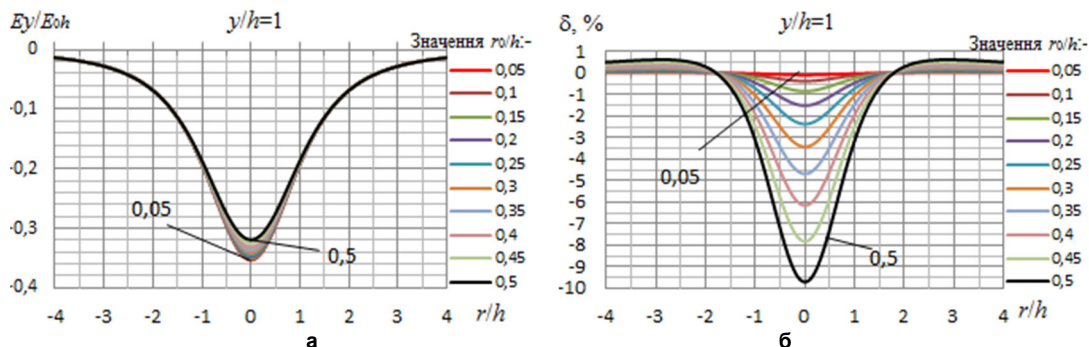


Рис. 7. Графіки поперечного градієнта електричного поля дискового витоку струму (а) та його розбіжності з поперечним градієнтом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h (поздовжній профіль $y/h=1$)

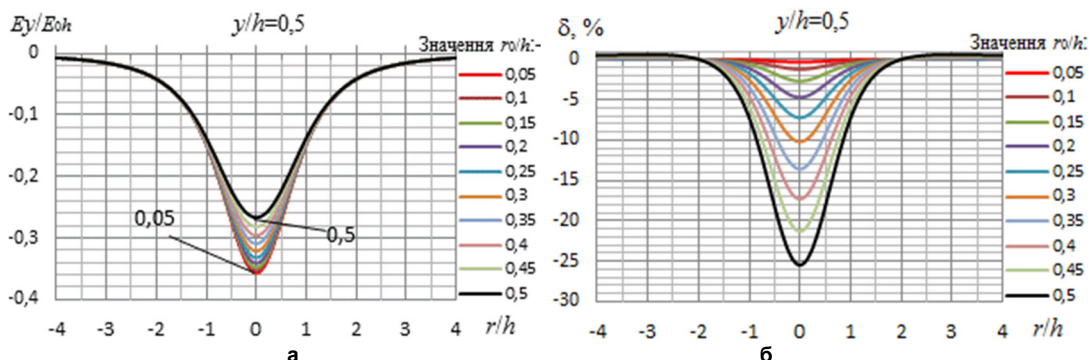


Рис. 8. Графіки поперечного градієнта електричного поля дискового витоку струму (а) та його розбіжності з поперечним градієнтом поля точкового джерела (б) для різних відносних розмірів диска r_0/h (поздовжній профіль $y/h=0,5$)

Розбіжність, а отже, вплив розмірів дискового джерела на поперечний градієнт зростає зі зменшенням відстані профілю (фактично розмірів вимірювальної лінії MN) від поздовжнього епіцентрального, що чітко засвідчують указані рисунки. Так, у разі $y/h = 1$ максимальна розбіжність, залежно від розмірів дискового джерела

змінюється в межах від 0 до 10 %, а на профілі $y/h = 0,5$ – від 0 до 25 %. Це необхідно враховувати: якщо метою зйомки поперечного градієнта є визначення розмірів джерела, то необхідно вибирати профіль ближчий до поздовжнього епіцентрального. З іншого боку необхідно відмітити, що зі зменшенням відстані до поздовжнього

профілю збільшується поздовжня відстань (модульні значення координати x), на якій при інтерпретації графіків поперечного градієнта можна застосовувати прості алгоритми, властиві для поля точкового джерела. Так, на профілі $y/h=1$ розбіжність $\delta \leq 0,7\%$ за будь-яких розмірів джерела поля в зазначеному інтервалі настає на відстані $x/h = 1,6$, а на профілі $y/h = 0,5$ – на відстані $x/h = 1,8$.

За результатами зйомки поперечного градієнта можна визначити глибину розташування джерела витоку струму h та його силу струму I , аналізуючи аномальні значення поперечного градієнта в інтервалі координати

$x \geq 1,8 h_{\max}$, де можна застосувати алгоритми інтерпретації поля точкового джерела (h_{\max} – максимально можлива глибина). Зокрема, за шириною аномалії на половинному рівні $q_{0,5}$ у разі, коли $q_{0,5}/(2h_{\max}) \geq 1,8 h$, визначається

$$h = \sqrt{0,4256 \cdot q_{0,5}^2 - y^2}. \quad (17)$$

Після цього можна визначити й силу струму I за будь-яким значенням поперечного градієнта в інтервалі пікетів $|x| > 1,8h$:

$$I = 2\pi \frac{E_x}{\rho} \cdot \frac{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}{y}. \quad (18)$$

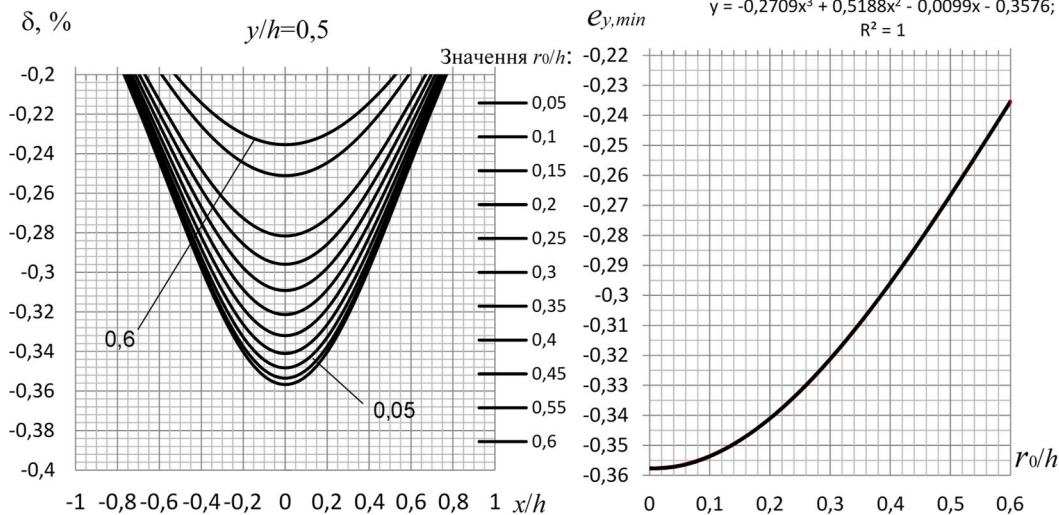


Рис. 9. Графіки нормованих значень поперечного градієнта в околі мінімуму (а) та кореляційного зв'язку нормованих амплітудних мінімумів з відносним розміром джерела r_0/h для профілю $y/h=0,5$

Для визначення радіуса дискового джерела струму необхідно після визначення h установити кореляційний зв'язок між нормованими значеннями мінімуму $e_{y,min} = E_{y,min}/E_{oh}$ і відносним розміром джерела r_0/h для конк-

$$e_{min} = -0,2709(r_0/h)^3 + 0,5188(r_0/h)^2 - 0,0099(r_0/h) - 0,3576 \quad R^2 = 1. \quad (19)$$

Після визначення h і r_0 можна також визначити силу струму I за мінімумом амплітудних значень поперечного градієнта:

$$I = \pi h^2 \frac{|E_{y,min}|}{\rho} \left\{ \left[\frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - 4(r_0/h)^2}}{(y_{min}/h + r_0/h)R_1 + (y_{min}/h - r_0/h)R_2} \right] \right\}, \quad (20)$$

де

$$R_1 = \sqrt{1 + (y_{min}/h - r_0/h)^2}, \quad R_2 = \sqrt{1 + (y_{min}/h + r_0/h)^2}.$$

Висновки. Аналізи результатів виконаних принципових досліджень дозволяють дійти висновків про те, що алгоритми інтерпретації, які ґрунтуються на теоретичній моделі поля точкового пошкодження, можуть бути застосовані для визначення глибин і сили струму витоків з дискових типів пошкоджень. Для графіків розподілу потенціалу поля ці алгоритми можна застосувати на відстанях від екстремуму потенціалу $r > 1,3h$. Для інтерпретації графіків розподілу поперечного градієнта умови застосування моделі поля точкового витоку струму залежать від відносної координати профілю точок вимірювання y/h . Так на профілі $y/h = 1$ розбіжність з полем точкового джерела $\delta \leq 0,7\%$ за будь-яких відносних розмірів джерела поля в інтервалі $r_0/h = 0,05 \div 0,5$ настає на відстані $x/h = 1,6$, а на профілі $y/h = 0,5$ – на відстані $x/h = 1,8$.

Чутливість графіків розподілу поздовжнього і поперечного градієнтів до розмірів дискового джерела вища, ніж графіків потенціалу поля. Визначення розмірів дискового джерела витоку струму можна здійснювати за амплітудними значеннями екстремумів поздовжнього

ретного профілю y/h (приклад графіків нормованого поперечного градієнта в околі мінімуму і графіка кореляційного зв'язку для профілю $y/h=0,5$ наведено на рис. 9. Сам кореляційний зв'язок має вигляд

градієнта та їхніми координатами відносно епіцентральної точки. Із цією метою можуть бути використані також екстремальні амплітудні значення поперечного градієнта і попередньо встановлено їхній кореляційний зв'язок з відносними розмірами джерела r_0/h для конкретного значення координати профілю y/h .

Список використаних джерел

- Глоба Р.М., Глоба Я.М., Зінченко І.М., Дзюба О.В. (2017). Геофізичні методи досліджень трас трубопровідних транспортних систем. *Вісник Київського університету. Серія "Геологія"*, 76, 42-46.
- Головцин В. М., Скопиченко М. Ф. (1961). Електрична розвідка корисних копалин. Київ: Видавництво Київського університету.
- Головцын В. Н. (1963). Электроразведка. Киев: Издательство АН УССР.
- Данилов А.В., Глоба, Р.Н., Дзюба О.В., Глоба Я.Н. (2016). Применение электрометрических методов и резонансно-акустического профилирования для изучения влияния геологической среды на трубопроводные транспортные системы. *Вестник ВКГУ им Серикбаева (Казахстан)*, 2, 213-224.
- Калькутин Ю.Г., Лукович В.В. (2012) Розрахунок площі пошкоджень протикорозійного покриття відрізка трубопроводу за даними електрометричних вимірювань. *Геофізичний журнал*, 34, 134-139.
- Лукович В.В. (2011). Електричне поле в околі пошкодження протикорозійного покриття трубопроводу. *Геофізичний журнал*, 33, 128-133.
- Прудников А.П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. (1983), Интегралы и ряды. Специальные функции. Москва: Наука.
- Danylov O.V. Hloba R.M., Korneenko S.V., Hloba Y.M. (2017). Geophysical and engineering methods in the study of the Ukrainian pipeline systems. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 5-11.
- Globa Ya.M., Reva M.V., Onyshchuk V.I. (2019). To the question of the detailing of electrical field anomalies caused by current leakage from pipeline damage. "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects", 2019 May 13-16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902146>

References

- Danylov A.V., Hloba R.M., Dzyuba O.V., Hloba Y.M. (2016). Primenenie elektrometricheskikh metodov i rezonansno-akusticheskogo profilirovaniya dlya izucheniya vliyaniya geologicheskoy sredy na truboprovodnye transportnye sistemy Vestnik VKGTU im Serikbaeva (Kazakhstan), 2, 213-224. [in Russian].
- Danylov O.V., Hloba R.M., Korneenko S.V., Hloba Y.M. (2017). Geophysical and engineering methods in the study of the Ukrainian pipeline systems. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 5-11.
- Globa Ya.M., Reva M.V., Onyshchuk V.I. (2019). To the question of the detailing of electrical field anomalies caused by current leakage from pipeline damage. "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects", 2019 May 13-16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902146>
- Hloba R. M., Zinchenko I. M., Hloba Y. M., Dziuba O. V. (2017). Application of geophysical methods for pipeline transport systems. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 76, 42-46 [in Ukrainian].

- Holovtyn V. M., Skopychenko M. F. (1961). *Elektrychna rozvidka korysnykh kopalyn*. Kyiv: Kyiv University Publishing (in Ukrainian).
- Holovtyn V. M. (1963). *Elektrorozvidka*. Kyiv: Publishing the USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Kal'kutin Y.G., Lukovich V.V. (2012) Rozrahunok ploshchi poshkodzhen' protikorozijnogo pokryttya vidrizka truboprovodu za danimi elektrometrichnih vimiryuvan'. *Geofizichnij zhurnal*, 34, 134-139 [in Ukrainian].
- Lukovich V.V. (2011). Elektrichne pole v okoli poshkodzheniya protikorozijnogo pokryttva truboprovodu. *Geofizichnij zhurnal*, 33, 128-133 [in Ukrainian].
- Prudnikov A.P., Brychkov Y. A., Marichev O. I. (1983). *Integraly i ryady. Special'nye funkcii*. Moskva: Nauka. [in Russian].

Надійшла до редколегії 12.08.2020

Y. Hloba^{1,3}, PhD student, deputy chief geophysicist,
E-mail: globa_yaroslav@ukr.net;
R. Hloba^{2,3}, PhD student, data processing geophysicist
E-mail: hloba_roman@ukr.net;
M. Reva³, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
S. Vyzhva³, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;

¹Limited liability company Enterprise LTD

54, Obolonsky Prospect, office A, Kyiv, 04214, Ukraine

²Limited liability company Vikoil LTD

7, Kudryavsky Uzviz str., office 211, Kyiv, 04053, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv,

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

INTERPRETATION POSSIBILITIES OF DISC TYPE SOURCES ELECTRIC FIELDS

As a result of aging of the protective insulation layer of underground pipelines, which occurs under the influence of external factors, in the insulating protective layer can form places where the insulation is damaged that cause a leakage of electric current under the protective potential of the pipe. These processes lead to a decrease in the protective potential of underground pipelines, and thus to a deterioration in the protection of underground utility system. Such damage locations are recorded by surveying the distribution of the electric potential "soil-pipe" (U_{sp}) along the pipeline route by the remote electrode and measuring the "transverse and longitudinal gradients" of the electric field. Since the places of electric current leakage are sources of electric fields, it is important to know the features of these fields in order to assess the degree and extent of damage. From a fundamental point of view, this question comes down to solving the inverse problem of electrometry for fields created by different structure sources. In the case of detailing anomalies, it is desirable to obtain electrometric survey data with an accuracy that allows to apply for their quantitative interpretation methods that base on analytical relationships for anomalies of these parameters. In this paper there is an analysis of the possibilities of using methods which is appropriate for fields created by point sources to interpret the anomalous field caused by a source of leakage current of the disk type damage.

Keywords: point source, disk type source, potential, current leakage strength.

Я. Глоба^{1,3}, асп., зам. главного геофизика
E-mail: globa_yaroslav@ukr.net;
Р. Глоба^{2,3}, асп., геофизик по обработке данных,
E-mail: hloba_roman@ukr.net;
Н. Рева³, канд. физ.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
С Вижва³, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;

¹Общество с ограниченной ответственностью "Энтерпрайз ЛТД"

пр. Оболонский, 54, оф. буква А, г. Киев, 04214, Украина

²Общество с ограниченной ответственностью "Викоил ЛТД"

ул. Кудрявский спуск, 7, оф. 211, г. Киев, 04053, Украина

³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ІНТЕРПРЕТАЦІЙНІ ВОЗМОЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ІСТОЧНИКОВ ДИСКОВОГО ТИПА

В результате старения слоя защитной изоляции подземных трубопроводов, которое происходит под действием внешних факторов, в изоляционном защитном слое могут образовываться места, где изоляция нарушается настолько, что происходит утечка электрического тока под действием защитного потенциала трубы. Эти процессы приводят к уменьшению защитного потенциала подземных трубопроводов, а следовательно, к ухудшению защищенности подземных коммуникаций. Такие места повреждений фиксируются съемкой распределения электрического потенциала "труба-земля" (U_{m3}) вдоль трассы трубопровода способом выносного электрода и измерениями "поперечного и продольного градиентов" электрического поля. Поскольку места утечки электрического тока являются источниками электрических полей, то важно знать особенности этих полей для оценки степени и размеров повреждений. С принципиальной точки зрения этот вопрос сводится к решению обратной задачи электрометрии для полей, создаваемых источниками различной структуры. В случае детализации аномалий данные электрометрическое съемки желательно получать с точностью, которая позволяет применять для их количественной интерпретации способы, основанные на аналитических соотношениях для аномалий этих параметров. В данной работе выполнен анализ возможностей использования для интерпретации аномального поля, вызванного источником утечки тока с повреждения диска типа, способов, применяемых для полей, создаваемых точечными источниками.

Ключевые слова: точечный источник, источник дискового типа, потенциал, сила утечки тока.