

ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИНДУКЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

© 2026 А.Н. Ратушняк¹, А.Д. Коноплин¹, И.Ю. Чудаев²

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620110;
e-mail: geo_info@mail.ru, pbs002@mail.ru

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144

Поступила в редакцию 02.05.2026; после доработки 04.09.2026; принята в печать 25.09.2026

Рассмотрены вопросы теории и методики наземной индуктивной электроразведки с измерением пространственно-временных инвариантов электромагнитного поля: характеристик эллипсов поляризации электрического и магнитного поля применительно к поискам месторождений рудных полезных ископаемых. Исследована эллиптическая поляризация переменного электрического поля в неоднородной среде для изучения возможности ее использования в наземных методах индуктивной электроразведки. Выполнено математическое моделирование рассеяния гармонического электромагнитного поля индуктивного источника на проводящем 3D объекте для определения информативности параметров полуосей эллипсов поляризации электрического и магнитного полей при выделении локальных проводящих тел. Результаты моделирования рассеяния гармонического электромагнитного поля индуктивного источника на локальном проводящем объекте показывает, что в широком диапазоне изменений физико-геометрических параметров эллиптическая поляризация электрического поля на всем применяемом спектре частот тока источника отражает присутствие проводящего 3D объекта. Измерения составляющих электромагнитного поля с определением полуосей эллипсов поляризации электрического и магнитного поля могут быть использованы для проведения исследований методом индукционных зондирований для поисков локальных проводящих тел.

Ключевые слова: эллипс поляризации электрического поля, пространственная ориентация измерительных систем.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения геоэлектрического строения верхней части Земной коры и поисков месторождений проводящих руд широко применяются индуктивные методы исследований, основанные на измерениях переменного электромагнитного поля (Астраханцев, 1988; Заборовский, 1960; Светов, 1973). Благодаря бесконтактному возбуждению и измерениям магнитного поля индуктивным способом есть возможность выполнять как дискретные наземные измерения при неподвижных положениях применяемых устройств, так и измерять поле в движении, что используется в воздушных и в скважинных методах исследований.

В применяемых методах электроразведки с индуктивным источником в виде незазем-

ленного контура с током или вертикального магнитного диполя есть несколько способов определения удельного электрического сопротивления среды по результатам измерений электромагнитного поля (Заборовский, 1960; Светов, 1973; Титлинов 1979). Общим недостатком способов с измерениями пространственных составляющих магнитного поля является необходимость в точной пространственной ориентации датчиков составляющих магнитного поля относительно источника (Электроразведка, 1989).

Известен способ, позволяющий избежать этого существенного недостатка: измерения пространственно-временных инвариантов магнитного поля, а именно — полуосей полного эллипса поляризации в пространстве с измерениями трех ортогональных составляющих магнитного поля,

предложенные в способе измерения и реализованные в разработанной аппаратуре (Ратушняк, Коноплин, 2023а, 2023б).

Достоинства этого способа заключаются в том, что не требуется пространственная ориентация системы датчиков составляющих поля и нет необходимости передачи опорного сигнала от генераторного устройства к измерительному, что определяет преимущество использования пространственно-временных инвариантных характеристик переменного магнитного поля по сравнению с использованием традиционных координатных измерений составляющих поля. Кроме того, использование измерений относительных фаз составляющих магнитного поля позволяет существенно упростить измерительное устройство, поскольку не требуется канала передачи опорного сигнала от генераторного источника поля к измерительному устройству (Ратушняк, Коноплин, 2023б).

При дистанционных индукционных зондированиях геологических сред на фиксированной частоте с источником в виде незаземленного контура с током или вертикального магнитного диполя определение кажущегося удельного электрического сопротивления однородного полупространства выполняют по величинам отношения полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля (Ратушняк, Коноплин, 2023а).

Измерения эллипса поляризации магнитного поля гармонического источника являются традиционными и давно используются в методах электроразведки (Светов и др., 1969). Возможность применения эллиптической поляризации электрического поля исследовалось ранее в инженерно-геологических изысканиях лишь с источником в виде заземленной линии (Кормильцев и др., 1997; Шлыков, Сараев, 2013). Применяемая пятиканальная аппаратура позволяет одновременно проводить измерения трех составляющих магнитного поля и двух составляющих электрического поля (Арзамасцев и др., 2018).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Если источник гармонического поля частотой ω в удаленной от источника точке измерений на поверхности проводящего полупространства создает электрическое поле с величинами горизонтальных составляющих напряженностей $E_i(t) = E_{0i} \cos(\varphi_i + \omega t)$, где E_{0i} — амплитудное значение и φ_i — относительная фаза i -той составляющей (x, y) напряженности, то величины полуосей эллипса поляризации электрического поля определяют по формулам (Светов, 1973) для двух составляющих поля E_{0x} и E_{0y} :

$$E_a = \sqrt{E_{0x}^2 \cos^2(\varphi_x + \alpha) + E_{0y}^2 \cos^2(\varphi_y + \alpha)},$$

$$E_b = \sqrt{E_{0x}^2 \sin^2(\varphi_x + \alpha) + E_{0y}^2 \sin^2(\varphi_y + \alpha)}, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{2} \arctg \left[-\frac{E_{0x}^2 \cos 2\varphi_x + E_{0y}^2 \cos 2\varphi_y}{E_{0x}^2 \sin 2\varphi_x + E_{0y}^2 \sin 2\varphi_y} \right].$$

Если выполняются фазочувствительные измерения синфазной (Re) и квадратурной (Im) тока в источнике составляющих E_x и E_y напряженности поля, (Светов, 1973; Электроразведка..., 1989), то величины полуосей эллипса поляризации электрического поля определяют как

$$E_a = \sqrt{(ReE_x \sin \theta + ReE_y \cos \theta)^2 + (ImE_x \sin \theta + ImE_y \cos \theta)^2},$$

$$E_b = \sqrt{(ReE_x \cos \theta - ReE_y \sin \theta)^2 + (ImE_x \cos \theta - ImE_y \sin \theta)^2}, \quad (2)$$

где угол наклона большой оси эллипса поляризации θ можно определить из соотношения

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \left[2 \frac{ReE_x \cdot ReE_y + ImE_x \cdot ImE_y}{|E_y|^2 - |E_x|^2} \right].$$

Особенностью поведения электрического поля индуктивных источников в виде вертикального или горизонтального магнитных диполей является то, что на границе «земля-воздух» поле имеет единственную азимутальную составляющую напряженности электрического поля и не зависит от горизонтальной слоистости, т.е. электрическое поле является поляризованным линейно. Для появления эллиптической поляризации электрического поля необходимо наличие в разрезе вертикальных контактов сред с различным электрическим сопротивлением или локального проводящего объекта.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Изучение эллиптической поляризации электрического поля в среде с проводящим 3D объектом выполнено с использованием математического моделирования методов индуктивной электроразведки с помощью пакета программ D6_ELECTRO (Ратушняк, 2024). Основной частью пакета является программа расчета составляющих напряженностей электрического и магнитного поля, создаваемых гармоническим током в незаземленном контуре или в магнитном диполе в присутствии проводящего 3D объекта, погруженного в проводящее полупространство. Уравнение рассеяния электромагнитного поля получено методом моментов и учитывает как электрическое возбуждение проводящего объекта токами проводимости, так и магнитное возбуждение локального проводника переменным магнитным полем. Программа реализует численное решение уравнения рассеяния гармонического

электромагнитного поля, приведенного к шестикомпонентной системе линейных алгебраических уравнений $A * X = B$ размерностью $6N * 6N$, где N — число элементарных объемов тела для напряженностей электрического и магнитного поля (Ратушняк, 2024). По результатам расчетов составляющих электромагнитного поля определяются дополнительные характеристики, отражающие перераспределение поля вблизи проводящих объектов: фазовые углы, тензор импеданса, вектор плотности энергии Умова-Пойнтинга (Матвеев, 1983), полуоси эллипсов поляризации электрического и магнитного поля, отношения составляющих поля и т.п.

В качестве стороннего источника гармонического электромагнитного поля будем использовать вертикальный магнитный диполь (ВМД) с моментом $M_z = 10^3 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, расположенный на границе «земля-воздух» в начале координат. Проводящий 3D объект в виде прямоугольного параллелепипеда имеет размеры $20 \times 30 \times 10 \text{ м}$, глубина центра тела $h = 40 \text{ м}$. Удельное электрическое сопротивление полупространства $\rho_o = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, проводящего объекта $\rho_v = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Выбор типа источника электромагнитного поля в виде вертикального магнитного диполя обусловлен тем, что аномальные части электрического и магнитного полей в виде E_r — составляющей электрического поля и H_φ — составляющей магнитного поля над локальным проводящим объектом, приводящие к эллиптической поляризации, будут отражать структуру и закономерности изменения полуосей эллипсов поляризации в зависимости от физико-геометрических характеристик модели.

Для изучения распределения аномальной величины E_r — составляющей электрического поля выполнены расчеты и анализ распределения квадратур Re и Im в виде планов изолиний Re (слева) и Im (справа) E_r — составляющей поля (мкВ/м) на частоте $f = 1 \text{ кГц}$ над проводящим 3D объектом, которая отсутствует в нормальном поле ВМД (рис. 1).

Подобные расчеты выполнены при различном пространственном положении 3D объекта как в виде горизонтальной, так и вертикальной пластины с ориентировкой максимальной стороны тела по осям X и Y и при различных значениях удельного сопротивления полупространства ρ_o .

Наличие E_r — составляющей электрического поля над проводящим объектом обуславливает появление эллиптической поляризации поля с соотношениями малой и большой полуосей эллипса в зависимости от физико-геометрических параметров локального проводящего тела, его пространственного положения относительно источника поля и применяемой частоты тока.

Форма изолиний, положение их эпицентров и знаки квадратур Re и Im E_r — составляющей поля соответствуют электрическому полю вторичного вертикального магнитного диполя, возникающего вблизи центра проводящего объекта с аномальным вертикальным моментом M_z со смещением к источнику (рис. 1). Это означает, что при возбуждении проводящего объекта полем индуктивного источника в виде вертикального магнитного диполя основным является возбуждение гармоническим магнитным полем источника — «магнитное возбуждение»,

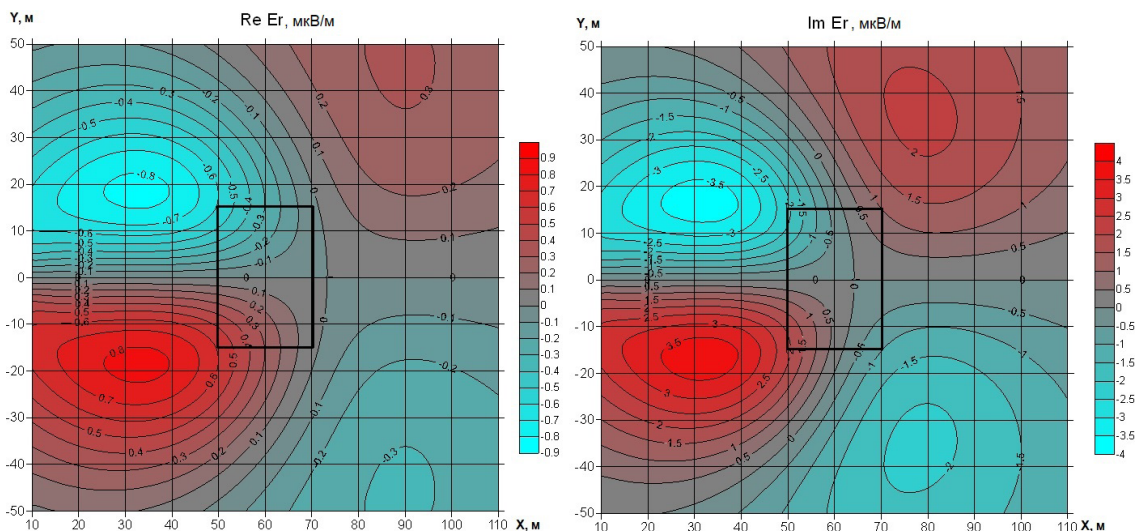


Рис. 1. План изолиний квадратур Re (слева) и Im (справа) аномальной E_r составляющей электрического поля (мкВ/м) над проводящим 3D объектом от источника в виде ВМД на частоте $f = 1 \text{ кГц}$. Прямоугольниками изображены проекции 3D тела на границу «земля-воздух».

Fig. 1. Isolines of the quadratures Re (left) and Im (right) of the anomalous E_r component of the electric field above a 3D conductive object from a VMD source at frequency of $f = 1 \text{ kHz}$. Rectangles show the projections of the 3D body onto the earth-air interface.

приводящее к возникновению в проводящем объекте вихревого индукционного тока.

По результатам расчетов горизонтальных составляющих электрического поля рассчитаны величины большой E_a и малой E_b полуосей эллипса поляризации поля для контроля по двум формулам (1) и (2), который показал их соответствие, и соотношение полуосей эллипса поляризации. Ввиду малости величины E_b по сравнению с E_a , поскольку в последней преобладает нормальное электрическое поля источника, в качестве информативной величины принято отношение E_b/E_a .

Результаты расчетов малой полуоси эллипса поляризации электрического поля E_b и соотношения полуосей E_b/E_a над проводящим 3D объектом (рис. 2), показывают, что в широком диапазоне изменений физико-геометрических параметров среды и 3D объекта наблюдается эллиптическая поляризация электрического поля на всем изученном спектре частот тока индуктивного источника в виде ВМД, обусловленная появлением аномальной радиальной E_r — составляющей напряженности электрического поля за счет рассеяния электромагнитного поля на локальном 3D проводящем объекте.

Локальный объект отмечается на плане изолиний отношения полуосей E_b/E_a четырех-экстремальной аномалией с квазиполюсами, тяготеющими к краям проводящего 3D объекта (рис. 2, слева).

Выполненное математическое моделирование рассеяния гармонического электромагнит-

ного поля источника в виде ВМД на 3D объекте показывает, что над локальным проводящим объектом наблюдается аномалия магнитного поля в виде B_φ — составляющей магнитной индукции, которая в нормальном поле источника над полупространством отсутствует.

Наличие B_φ -составляющей магнитной индукции, приведенной над проводящим объектом (рис. 3), обуславливает появление пространственной эллиптической поляризации магнитного поля в отличие от поляризации поля в плоскости «источник-приемник», наблюдаемой в случае полупространства или горизонтально-слоистой среды (Светов и др., 1969).

Пространственная эллиптическая поляризация магнитного поля индуктивного источника электромагнитного поля над локальным проводящим объектом исследовалась нами ранее (Ратушняк, Коноплин, 2023а).

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Совместные измерения составляющих электрического и магнитного поля в наземных методах индуктивной электроразведки ранее использовались при поисках и разведке рудных месторождений методом радиальных индукционных зондирований (РИЗ), который с успехом применялся на большом количестве месторождений Среднего и Южного Урала, но только при профильных исследованиях (Титлинов, 1975,

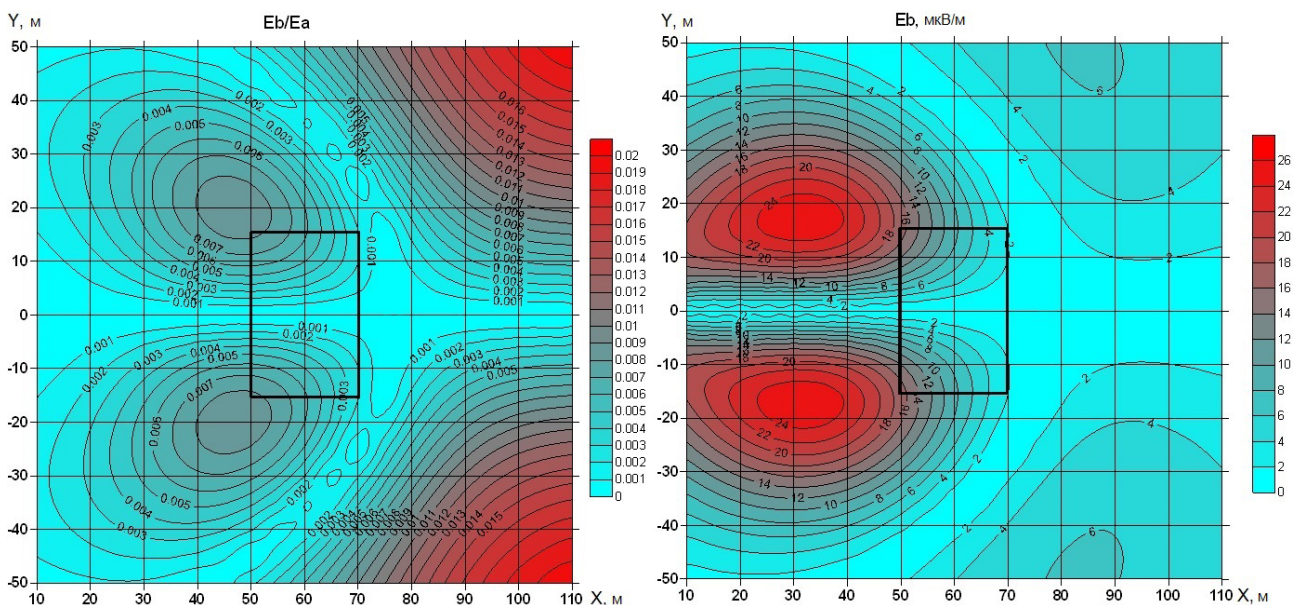


Рис. 2. Планы изолиний малой полуоси эллипса поляризации электрического поля E_b , мВ/м (справа) и соотношения E_b/E_a над проводящим 3D объектом от источника в виде ВМД на частоте $f = 1$ кГц. Прямоугольниками изображены проекции 3D тела на границу «земля-воздух».

Fig. 2. Isolines of the minor semi-axis of the electric field polarization ellipse E_b (right) and the E_b/E_a ratio above a 3D conductive object from a VMD source at frequency of $f = 1$ kHz. Rectangles show the projections of the 3D body onto the earth-air interface.

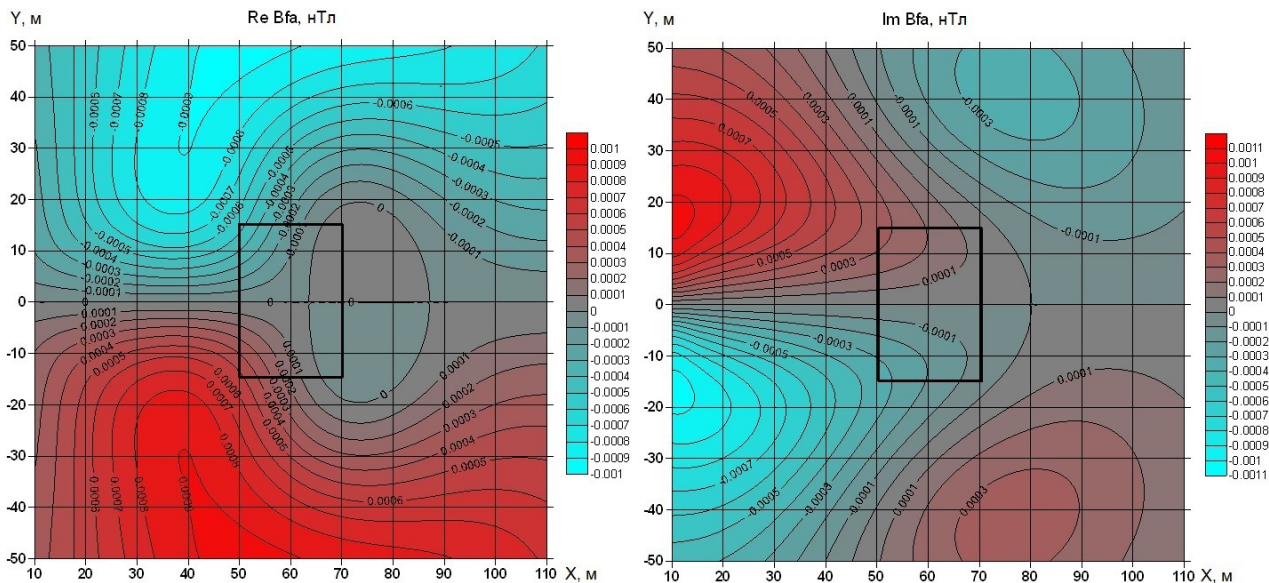


Рис. 3. План изолиний квадратур Re (слева) и Im (справа) аномальной B_φ составляющей магнитного поля (нТл) над проводящим 3D объектом от источника в виде ВМД на частоте $f = 1$ кГц. Прямоугольниками изображены проекции 3D тела на границу «земля-воздух».

Fig. 3. Isolines of the quadratures Re (left) and Im (right) of the anomalous B_φ component of the magnetic field above a 3D conductive object from a VMD source at frequency of $f = 1$ kHz. Rectangles show the projections of the 3D body onto the earth-air interface.

1977; Титлинов, Астраханцев, 1975). Информативным параметром, используемым для интерпретации, является вертикальный импеданс $Z_z = E/H_z$, по величине которого рассчитывается кажущееся электрическое сопротивление среды в Ом·м: $\rho_k = r \cdot Z/4$ (Титлинов, Астраханцев, 1975).

Методику РИЗ можно модернизировать для проведения исследований методом дистанционных индукционных зондирований на площади. Для этого необходимо проводить совместные измерения составляющих электрического и магнитного поля с определением полуосей эллипсов поляризации электрического и магнитного поля, а в качестве информативных параметров использовать импедансы, составленные из соотношения полуосей эллипсов поляризации электрического и магнитного поля.

Результаты математического моделирования приведены на (рис. 4). Электромагнитное поле создается гармоническим током в незаземленном контуре размером 200 x 200 м с центром, расположенным в начале координат. Проводящий 3D объект в виде прямоугольного параллелепипеда имеет размеры по осям 200×300×100 м, глубина погружения центра $h = 200$ м. Удельное электрическое сопротивление полупространства $\rho_0 = 500$ Ом·м, проводящего объекта $\rho = 1$ Ом·м.

Учитывая то, что появление малой полуоси эллипса поляризации электрического поля обусловлено наличием локального проводящего объекта, на рис. 4 приведены планы изолиний импедансов по сети наблюдений на дневной поверхности, составленных из отношений малой

полуоси эллипса поляризации электрического поля к малой (слева) и большой (справа) полуосям эллипса поляризации магнитного поля. Импедансы следует называть Z_{bb} — максимальным и Z_{ba} — минимальным.

Наличие проводящего объекта отмечается аномалией, имеющей четыре экстремума. На планах изолиний импедансов Z_{bb} и Z_{ba} положение центра проводящего 3D объекта соответствует пересечению вертикальных и горизонтальных линий минимумов.

Изложенный метод положен в основу изобретения «Способ геоэлектроразведки» (Ратушняк, Конопкин, 2026).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При поисках локальных проводников методом индукционных зондирований наблюдается эллиптическая поляризация электрического и магнитного поля, обусловленная рассеянием электромагнитного поля на проводящем 3D объекте.

При измерениях полуосей эллипсов поляризации электрического и магнитного полей не требуется пространственная ориентация системы датчиков составляющих поля, что полностью исключает методическую погрешность измерений.

Использование измерений относительных фаз составляющих электрического и магнитного поля позволяет существенно упростить измерительное устройство для определения

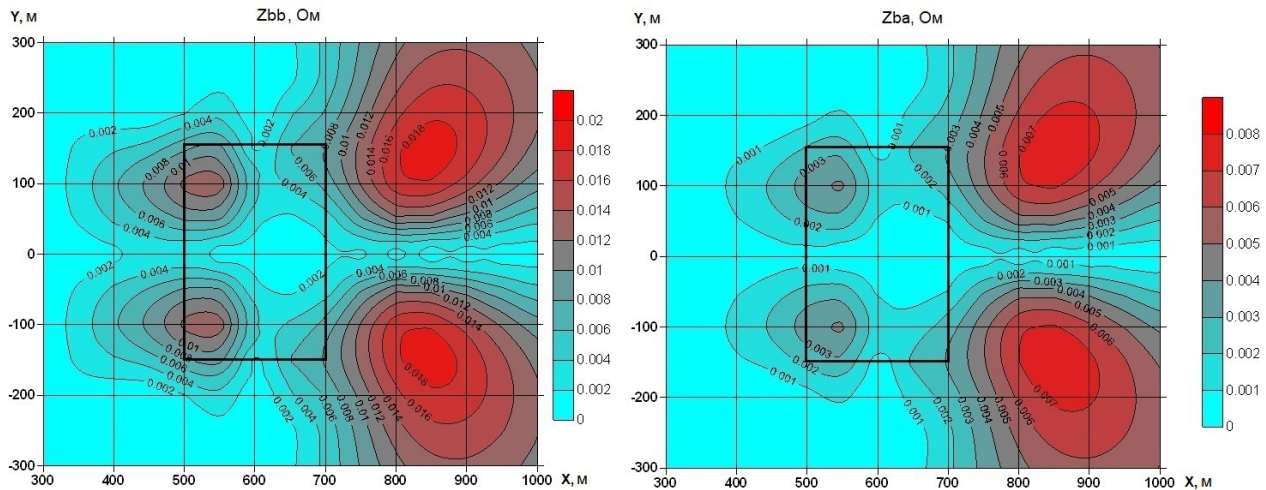


Рис. 4. Планы изолиний импедансов Z_{bb} , Ом (слева) и Z_{ba} , Ом (справа) электромагнитного поля тока частотой $f = 525$ Гц в незаземленном контуре над проводящим 3D объектом. Прямоугольниками изображены проекции тела на границу «земля-воздух».

Fig. 4. Isolines of the impedances Z_{bb} (left) and Z_{ba} (right) of the electromagnetic field of a current with a frequency of $f = 525$ Hz in an ungrounded circuit above a conductive object. Rectangles show the projections of the 3D body onto the earth-air interface.

полуосей эллипсов поляризации поля, поскольку не требует канала передачи фазы тока от источника поля к измерителю.

Использование относительных характеристик электромагнитного поля — импедансов, составленных из отношений малой полуоси эллипса поляризации электрического поля к большой или малой полуоси эллипса поляризации магнитного поля, позволяет определять наличие и центр объекта, обладающего пониженным сопротивлением.

Измерения полуосей эллипса поляризации электрического поля дополнительно к измерениям магнитного поля в наземной индуктивной электроразведке позволяют получить полезную дополнительную информацию при поисках локальных проводящих объектов.

Список литературы [References]

- Арзамасцев Е.В., Коноплин А.Д., Астафьев П.Ф. Многочастотный комплекс фазочувствительного частотного индукционного зондирования. // Датчики и системы. 2018. № 5. С. 55–60 [Arzamastsev E.V., Konoplin A.D., Astaf'ev P.F. The complex of multifrequent phase sensitive induction sounding. // Datchiki i sistemy. 2018. № 5. P. 55–60 (in Russian)].
- Астраханцев Г.В. Индукционное зондирование при изучении контрастных по электропроводности сред. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 182 с. [Astrakhan'tsev G.V. Induktsionnoe zondirovanie pri izuchenii kontrastnykh po elektroprovodnosti sred. Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1988. 182 p. (in Russian)].
- Заборовский А.И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. М.: МГУ, 1960. 186 с. [Zaborovskiy A.I. Peremennye elektromagnitnye polya v electrorazvedke. Moscow: MGU, 1960. 186 p. (in Russian)].

Кормильцев В.В., Улитин Р.В., Человечков А.И. Способ геоэлектроразведки. Патент РФ № 2090909. 20.09.1997 [Kormiltsev V.V., Ulitin R.V., Chelovechkov A.I. Sposob geoelektrozvedki. Pat. RU No 2090909. published 20.09.1997 (in Russian)].

Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с. [Matveev A.N. Elektrichestvo i magnetizm. Moscow: Vysshaya shkola, 1983. 463 p. (in Russian)].

Ратушняк А.Н. Рассеяние электромагнитного поля на проводящих 3D объектах. Екатеринбург: УрО РАН, 2024. 190 с. [Ratushnyak A.N. Rasseyanie elektromagnitnogo polya na provodyaschikh 3D ob'ektakh. Yekaterinburg: UrO RAN. 2024. 190 p. (in Russian)].

Ратушняк А.Н., Коноплин А.Д. Низкочастотная электроразведка с измерениями пространственных инвариантов магнитного поля // Известия УГГУ. 2023. Вып. 3(71). С. 112–119 <https://doi.org/10/21440/2307-2091-2023-3-112-119> [Ratushnyak A.N., Konoplin A.D. Low frequency electrical prospecting with measurements of spatial-temporal invariants of the magnetic field // Izvestiya UGGU. 2023. Iss. 3(71) P. 112–119 (in Russian)].

Ратушняк А.Н., Коноплин А.Д. Способ измерения полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2793393. 03.04.2023. Бюл. № 10 [Ratushnyak A.N., Konoplin A.D. Sposob izmereniya poluosey polnogo ellipsa polyarizatsii magnitnogo polya i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya. Pat. RU No 2793393. published 03.04.2023. bul. No 10. (in Russian)].

Ратушняк А.Н., Коноплин А.Д. Способ геоэлектроразведки. Патент РФ № 2859683. 07.04.2026. Бюл. № 10. [Ratushnyak A.N., Konoplin A.D. Sposob geoelektrozvedki. Pat. RU № 2859683. published 07.04.2026. bul. No 10. (in Russian)].

Светов Б.С. Теория, методика интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 254 с. [Svetov B. S. Teoriya,

- metodika interpretatsii materialov nizkочастотной индуктивной электроразведки. Moscow: Nedra. 1973. 254 p. (in Russian)].
- Светов Б.С., Мизюк Л.Я., Поджарый В.М. Рудная электроразведка по методике эллиптически поляризованного поля. М.: Недра, 1969. 136 с. [Svetov B.S., Miziuk L.Ya., Podzhariy V.M. Rudnaya elektrorazvedka po metodike ellipticheskii polarizovannogo polya. Moscow: Nedra, 1969. 136 p. (in Russian)].
- Титлинов В.С. Индукционное электромагнитное зондирование при поисках рудных месторождений. Свердловск: ИГФ УНЦ АН СССР, 1979. 132 с. [Titlinov V.S. Induktsionnoe elektromagnitnoe zondirovanie pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy. Sverdlovsk: IGF UNTs AN SSSR, 1979. 132 p. (in Russian)].
- Титлинов В.С. Особенности аномалий низкочастотного переменного тока над колчеданными месторождениями Урала // Электроразведка в области скважин на колчеданных месторождениях Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 121–135 [Titlinov V.S. Osobennosti anomalii nizkочастотного peremennogo toka nad mestorozhdeniyami Urala // Electrorazvedka v oblasti skvazhin na kolchedannykh mestirizhdeniyakh Urala. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR. 1975. P. 121–135 (in Russian)].
- Титлинов В.С. Применение метода радиального индукционного зондирования на глубокозалегающем колчеданном месторождении // Электрометрические исследования при поисках и разведке рудных месторождений. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 49–52 [Titlinov V.S. Primenenie metoda radial'nogo induktsionnogo zondirovaniya na glubokozalegayuschem kolchedannom mestorozhdenii // Elektrometricheskie issledovaniya pri poiskakh i razvedke rudnykh poleznykh iskopaemykh. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR. 1977. P. 49–52 (in Russian)].
- Титлинов В.С., Астраханцев Г.В. Радиальное индукционное зондирование на колчеданных месторождениях Урала // Электроразведка в области скважин на колчеданных месторождениях Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 107–120 [Titlinov V.S., Astrakhtantsev G.V. Radial'noe induktsionnoe zondirovanie na kolchedannykh mestorozhdeniyakh Urala. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR. 1975. P. 107–120 (in Russian)].
- Шлыков А.А., Сараев А.К. Особенности электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в методе радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником // Вестник СПб университета. 2013. Сер. 7. Вып. 4. С. 3–23 [Shlykov A.A., Saraev A.K. Osobennosti elektromagnitnogo polya gorizontalnogo elektricheskogo dipolya v metode radiomagnitotelluricheskikh zondirovaniy s kontroliruемым istochnikom // Vestnik SPb university. 2013. V. 7. № 4. P. 3–23 (in Russian)].
- Электроразведка. Справочник геофизика. Книга первая // Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М.: Недра, 1989. 438 с. [Electrical prospecting. Geophysicist's handbook // Edited by V.K. Khmelevskoi, V.M. Bondarenko. Moscow: Publishing House «Nedra», 1989. V. 1. 438 p. (in Russian)].

ELLIPTICAL POLARIZATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN INDUCTIVE SOUNDING OF GEOLOGICAL MEDIA

A.N. Ratushnyak¹, A.D. Konoplin¹, I.Yu. Chudaev²

¹*Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 620016*

²*Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, 620144*

Received May 02, 2026; revised September 04, 2026; accepted September 25, 2026

The paper addresses theoretical and methodological issues of ground-based inductive electrical prospecting involving the measurement of space-time invariants of the electromagnetic field — specifically, the polarization ellipse characteristics of the electric and magnetic fields — as applied to the exploration of ore mineral deposits. The elliptical polarization of an alternating electric field in an inhomogeneous medium is investigated to assess the feasibility of its use in ground-based inductive electrical prospecting methods. Mathematical modeling of the scattering of a harmonic electromagnetic field from an inductive source on a conductive 3D object was performed to determine the information content of the semiaxis parameters of the electric- and magnetic-field polarization ellipses for detecting local conductive bodies. The results of simulations of the scattering of a harmonic electromagnetic field from an inductive source on a local conductive object show that, over a wide range of variations in physical and geometric parameters, the elliptical polarization of the electric field across the entire frequency spectrum of the source current reflects the presence of the local 3D object. Measurements of electromagnetic field components with determination of the semi-major axes of the polarization ellipses of the electric and magnetic fields can be used for conducting studies using the inductive sounding method for the exploration of local conductive bodies.

Keywords: ellipse of electric field polarization, spatial orientation of measurement systems.