

## МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ МЕТОДАМИ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В.С. Могилатов<sup>1,2</sup>, Н.О. Кожевников<sup>1,2</sup>, А.В. Злобинский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

<sup>3</sup>ООО «НТК ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Новосибирск, ул. Восход, 26/1, оф. 56, Россия

Методы сопротивлений и вызванной поляризации нашли широкое применение при геологическом картировании, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых (МПИ), решении задач инженерной геологии, гидрогеологии, геотехнических задач, археологии, окружающей среды. Они составляют историческую основу современной электроразведки. В этих методах с помощью заземленной линии в землю вводится постоянный либо переменный низкочастотный электрический ток. Измеряемой величиной обычно является электрическое поле. Однако, если электрические параметры среды изменяются по горизонтали, появляется аномальное магнитное поле, на изучении которого основаны магнитные методы сопротивлений и вызванной поляризации. Эти методы применяются преимущественно за рубежом, где они известны соответственно как «Magnetometric Resistivity (MMR) method» и «Magnetic Induced Polarization (MIP) method». При использовании этих методов возникают проблемы, которые редко в полной мере освещают их приверженцы и пользователи. По-видимому, основная проблема, ограничивающая чувствительность этих методов, связана с тем, что на дневной поверхности, наряду с аномальным, присутствует нормальное магнитное поле источника (линии). Нормальное поле не содержит информации об изучаемой среде и на порядок превышает аномальное поле. Это делает актуальной разработку эффективных приемно-питающих установок. В статье в качестве таковой рассматривается схема с источником в виде кругового электрического диполя.

*Электроразведка, методы сопротивлений, магнитное поле, DC, MMR, MIP, круговой электрический диполь.*

## MAGNETIC MEASUREMENTS IN ELECTRICAL PROSPECTING BY RESISTIVITY METHODS

V.S. Mogilatov, N.O. Kozhevnikov, and A.V. Zlobinskii

The electrical resistivity and induced polarization (IP) methods are widely used in geological mapping, prospecting and exploration of mineral deposits, engineering geology, hydrogeology, archaeology, and geotechnical and environmental applications. Historically, these methods have formed the basis of the electrical prospecting technique. In these methods, a DC or low frequency AC electrical current is introduced into the earth through a grounded transmitter circuit. The measured quantity is the electric field. However, if the earth's resistivity or chargeability changes horizontally, this change gives rise to an anomalous magnetic field, which is studied by the magnetometric resistivity (MMR) and magnetic induced polarization (MIP) methods, respectively. Along with advantages, some shortcomings are inherent in the MMR and MIP techniques. Apparently, the main drawback of these methods is that the magnetic fields of both transmitter circuit wire and ground electrodes on the surface are several orders of magnitude greater than the anomalous magnetic field response. This introduces a significant «noise» to magnetic-resistivity data. We investigate the potential of using the circular electric dipole (CED) in magnetometric resistivity techniques. It has been found that application of a CED, instead of a conventional transmitter circuit, dramatically enhances the signal-to-noise ratio.

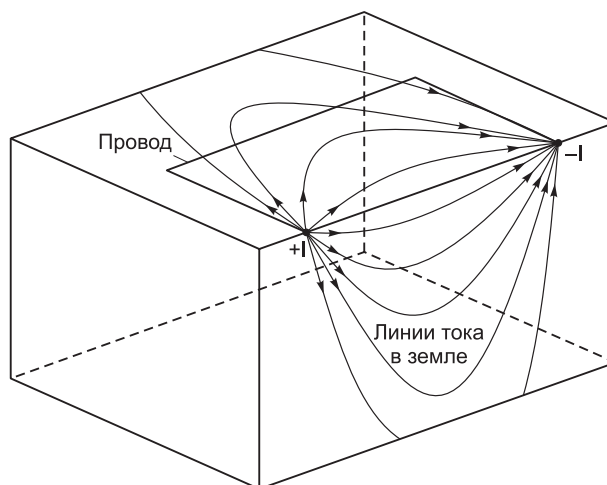
*Electrical prospecting, resistivity methods, magnetic field, DC, MMR, MIP, circular electric dipole*

## ВВЕДЕНИЕ

Методы сопротивлений (электропрофилирование, вертикальные и дипольные электрические зондирования) и вызванной поляризации (ВП) нашли широкое применение при геологическом картировании, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых (МПИ), решении задач инженерной геологии, гидрогеологии, геотехнических задач, археологии, окружающей среды. Исторически они составляют основу современной электроразведки.

Как правило, в этих методах с помощью заземленной линии (AB) в землю вводится постоянный либо переменный низкочастотный электрический ток (рис. 1). Распределение электрического поля и,

**Рис. 1. Общий вид установки, используемой в методах MMR и MIP.**



соответственно, тока в земле зависит от длины линии и распределения удельного электрического сопротивления (УЭС). Измеряемой величиной является электрическое поле, на практике — разность потенциалов между электродами приемной заземленной линии (MN). В методах сопротивлений электрическое поле измеряется во время пропуска тока, в методе ВП — после его выключения (в паузах между токовыми импульсами). В частотном методе ВП на одной либо нескольких частотах измеряют модуль и/или фазу напряжения между приемными электродами [Sumner, 1976] либо — в методе ИНФАЗ ВП — разность фаз на двух частотах [Куликов, Шемякин, 1978]. За рубежом метод ВП с измерением на нескольких частотах известен как Spectral Induced Polarisation (SIP) [Reynolds, 2011], или «спектральный метод ВП». Однако токи, протекающие в земле, создают не только электрическое, но и магнитное поле. На поверхности горизонтально-слоистой земли вертикальная компонента магнитного поля этих токов равна нулю. Горизонтальная компонента не равна нулю, однако не зависит от вертикального распределения электропроводности и/или поляризуемости. Если же электрические параметры земли изменяются по горизонтали, появляется аномальное магнитное поле, на изучении которого основаны магнитные методы сопротивлений и вызванной поляризации. Эти методы применяются преимущественно за рубежом, где они известны соответственно как «Magnetometric Resistivity (MMR) method» [Edwards, Nabighian, 1991] и «Magnetic Induced Polarization (MIP) method» [Seigel, 1974].

В методах MMR и MIP измеряется магнитное поле, или чаще — ЭДС, в приемной рамке, пропорциональной скорости его изменения. Обычно регистрируют горизонтальную компоненту магнитного поля, перпендикулярную линии, соединяющей питающие электроды. Поскольку измерения осуществляются бесконтактным способом, эти методы по сравнению с традиционными имеют преимущество, когда заземление приемных электродов затруднено или невозможно (засушливые районы, скальные породы, осыпи, курумники, мерзлота и т.п.). В числе других преимуществ методов MMR и MIP отмечается возможность изучать объекты, перекрытые проводящими наносами, а также слабое влияние приповерхностных неоднородностей.

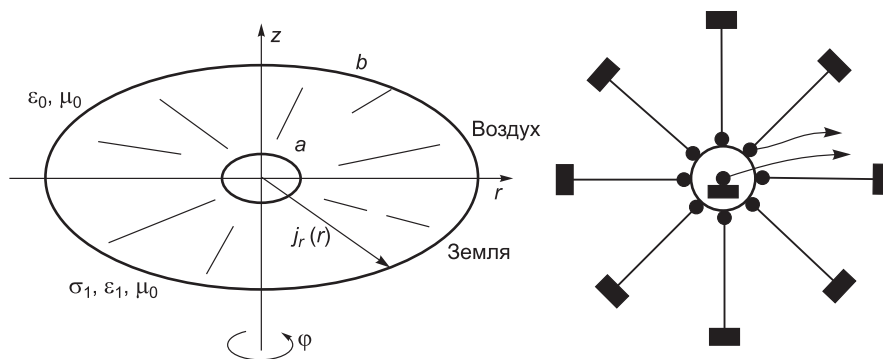
Аномалии магнитного поля возникают вследствие того, что протекающие в земле токи концентрируются в зонах пониженного сопротивления или вытесняются из участков повышенного сопротивления. Поэтому методы MMR и MIP особенно эффективны при поисках и изучении вытянутых тел с простиранием по направлению, близкому к линии, соединяющей электроды A и B. Это аномалии так называемого концентрационного типа [Dentith, Mudge, 2014]. В относительном выражении их амплитуда не зависит от абсолютных значений электрических параметров вмещающей среды и создающего аномалию объекта, а только от их контраста.

Интерпретацию данных MMR проводят с помощью нормированного параметра  $H_n$ , представляющего отношение измеренного поля  $H_{изм}$  к нормальному  $H_{норм}$  (рассчитывается для конкретной установки, если необходимо, с учетом рельефа):  $H_n(\%) = (H_{изм}/H_{норм}) \times 100$ . Значения  $H_n$  выше 100 % указывают на «избыток» тока, т. е. присутствие проводящего «канала», ниже 100 % — «дефицит» тока, т. е. объект или зону повышенного сопротивления.

Другой параметр, MMR, как полагают, позволяет достичь лучшей разрешающей способности. Его вычисляют по формуле:  $MMR(\%) = 100 \times (H_{изм} - H_{норм_б})/H_{норм_б}$ , где  $H_{норм_б}$  — нормальное поле, рассчитанное для некоторой «базовой» или «референтной» точки. Обычно в качестве таковой выбирают середину прямой, соединяющей электроды питающей линии.

Как и любым другим, методам MMR и MIP наряду с достоинствами присущи недостатки. Так, при их использовании возникают проблемы, которые редко в полной мере отмечаются теми, кто эти методы «продвигает» или «пропагандирует». По-видимому, основная проблема, ограничивающая чувствительность этих методов, связана с тем, что на дневной поверхности наряду с аномальным присутствует магнитное поле, которое не содержит информации об изучаемой среде.

Это поле имеет несколько составляющих. Во-первых, это геомагнитное поле, которое на много порядков превышает аномальное магнитное поле. Обычно эта проблема решается за счет возбуждения среды низкочастотным переменным током и индукционного приема с помощью рамки. Во-вторых, это



**Рис. 2. Идеальный и реальный круговой электрический диполь.**

поле провода, соединяющего питающие электроды, которое в контексте настоящей статьи можно назвать первичным полем. На ровной местности оно направлено вертикально. Его напряженность намного больше, чем вертикальная компонента аномального поля. Поэтому обычно измеряют горизонтальную компоненту магнитного поля или его производную. И, наконец, это «нормальное» поле заземлений, которое направлено горизонтально. Если рельеф не плоский, это необходимо учитывать при расчете поля провода и нормального поля. При вычислении аномального поля погрешности в определении геометрии системы трансформируются в «полезный» сигнал, который на самом деле таковым не является. Поскольку аномальное поле намного меньше поля провода и поля заземлений, погрешность аномального сигнала может быть очень большой. Описанная ситуация аналогична возникающей при изучении частотно-зависимой магнитной восприимчивости [Кожевников и др., 2014].

Обозначенная проблема обычно отмечается в публикациях, однако в практическом отношении все зависит от количественных соотношений. Мы предлагаем довольно радикальное решение, заключающееся в использовании источника, который позволяет вводить в землю такой же ток, как и линия, но при этом не имеет собственного магнитного поля. Такой источник существует — это круговой электрический диполь (КЭД). Теория КЭД и методы электроразведки, основанные на его применении, описаны во многих публикациях. Укажем здесь только [Могилатов, Злобинский, 2014] и итоговую работу [Могилатов, 2014]. В этих публикациях рассмотрены частотный и переходный режимы. Исключение составляет только давняя работа [Могилатов, Злобинский, 1995], в которой приведен анализ постоянного электрического поля КЭД. В настоящей статье впервые исследуется возможность применения КЭД в методах постоянного тока с измерением магнитного поля.

#### КЭД: определения

Будем называть круговым электрическим диполем используемое в теории азимутально-однородное распределение поверхностного (в А/м) стороннего радиального тока, заземленного по окружностям с радиусами  $a$  и  $b$  (рис. 2, слева). Например, так [Mogilatov 1996]:

$$j_r^{cm}(r) = \frac{I}{2\pi r} \cdot [U(r-b) - U(r-a)], \quad (1)$$

где  $U(x)$  — функция Хевисайда. Очевидно, наибольшее практическое значение имеет случай, когда  $a \rightarrow 0$ , т. е. внутренняя окружность «вырождается» в центральное заземление. На практике применяется реализация КЭД посредством конечного набора линий (рис.1, справа).

#### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИДЕАЛЬНОГО КРУГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ

При расположении КЭД на поверхности горизонтально-слоистого проводящего полупространства магнитное поле в воздухе и на дневной поверхности отсутствует. Покажем это, воспользовавшись цилиндрической системой координат. Согласно интегральному представлению одного из уравнений Максвелла, циркуляция вектора  $\mathbf{H}$  по любому замкнутому контуру  $L$  равна полному току через произвольную поверхность  $S$ , ограниченную данным контуром:

$$\int_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{j} ds. \quad (2)$$

Из общих соображений, с учетом осевой симметрии идеального источника и среды, вытекает, что магнитное поле имеет только компоненту  $H_\varphi$ . Поэтому, взяв контур  $L$  в (2) в виде соосной с КЭД окружности радиуса  $r$ , а в качестве  $S$  — круг, ограниченный этой окружностью, получим:

$$2\pi r H_\varphi = \int_S \mathbf{j} ds. \quad (3)$$

Поскольку в воздухе нет токов,  $H_\varphi = 0$ . Другими словами, в воздухе и на дневной поверхности магнитные поля центрального заземления, внешнего заземления и радиального тока взаимно компенсируются. Заметим, что этот вывод остается верен и в случае соосной с КЭД осесимметричной неоднородности. Очевидно, для того чтобы обнаружить такую неоднородность, необходимо разнести центры КЭД и неоднородности.

Итак, в отличие от магнитного поля петли или линии, поле идеального КЭД на дневной поверхности равно нулю. В этом заключается уникальная особенность КЭД и его ценность для метода сопротивлений с измерением магнитного поля (ММР). Мы вправе ожидать, что применение КЭД позволит измерять аномальные поля низкого уровня и тем самым повысить чувствительность и разрешающую способность метода сопротивлений, основанного на измерении магнитного поля.

### 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБЪЕКТА. ИСТОЧНИК — ИДЕАЛЬНЫЙ КЭД

На рис. 3 показан локальный объект с размерами  $200 \cdot 100 \cdot 80$  м и удельным электрическим сопротивлением  $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Объект располагается на глубине  $100$  м в слое вмещающих пород с сопротивлением  $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , подстилаемом проводящим основанием. Для возбуждения среды и объекта используется круговой электрический диполь радиусом  $100$  м с током  $1$  А.

На рис. 4 представлены карты изолиний для двух компонент магнитной индукции. Расчеты выполнены методом конечных элементов с помощью программы GeoPrep [Персова и др., 2011]. Как нетрудно видеть, объект отчетливо проявляется благодаря отсутствию прямого поля источника. Максимальные абсолютные значения компонент магнитной индукции ( $B_\varphi$  и  $B_z$ ) составляют примерно  $10^{-9}$  мТл. Вертикальная компонента ( $B_z$ ) дает дипольную аномалию на карте изолиний.

Еще раз подчеркнем, что такой результат не может быть получен в случае использования в качестве источника заземленной линии. Поскольку первичное поле линии на три порядка больше аномального поля, незначительные погрешности определения параметров линии и измерительной системы приводят к очень большим погрешностям определения аномального поля.

### ОСТАТОЧНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РЕАЛЬНОГО КЭД

Как показывает приведенный выше пример (см. рис. 4), применение идеального кругового электрического диполя в принципе решает проблему прямого поля источника. Однако реальный КЭД отличается от идеального. Установка небольших размеров в виде металлического диска или сетки с центральным заземлением и с равномерным заземлением по краям может быть достаточно близка к идеальной. Однако, если необходим источник больших размеров, для его раскладки используют несколько (обычно восемь) радиальных линий. Очевидно, КЭД с конечным числом радиальных линий имеет некоторое остаточное (прямое) магнитное поле. Оценим отличие источника, составленного из восьми токовых линий, от идеального.

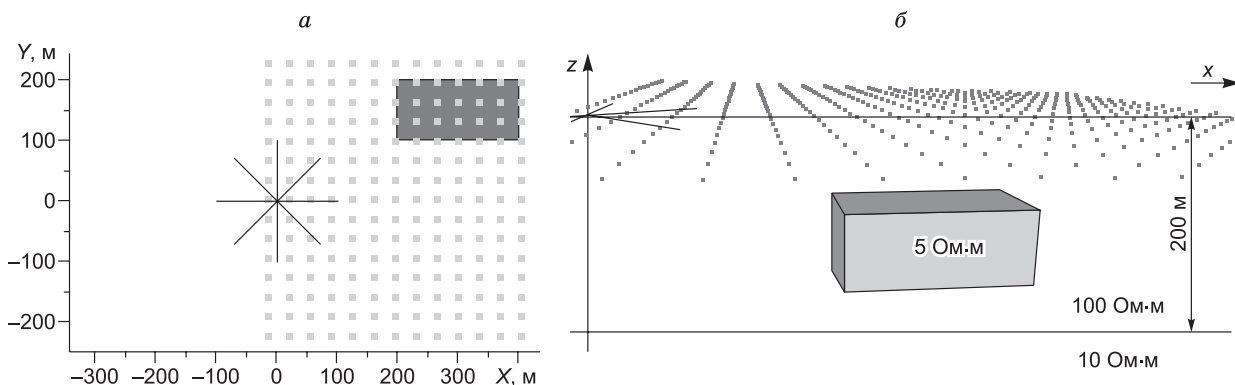
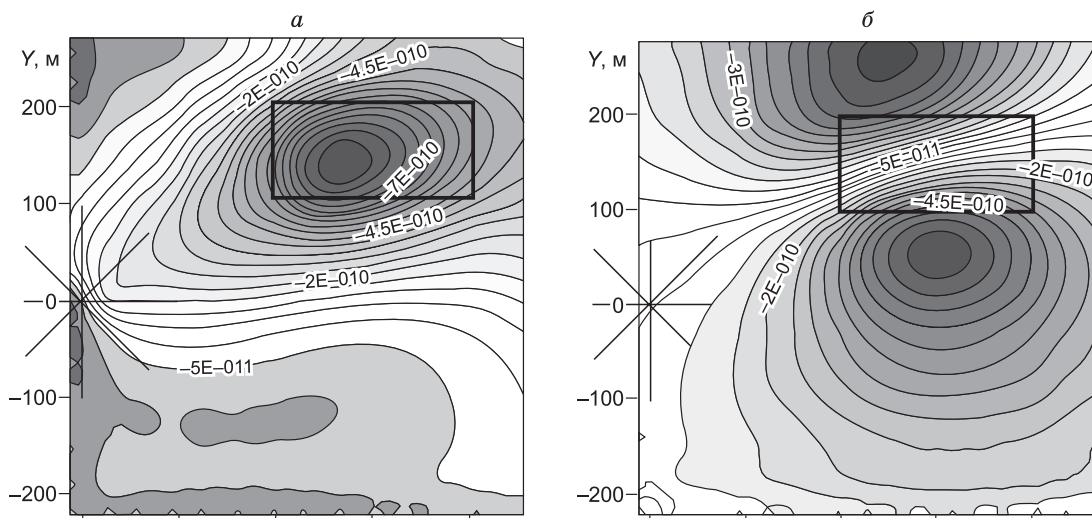


Рис. 3. 3D модель: план (а) и разрез (б).



**Рис. 4.** Карты изолиний  $B_\phi$  (а) и  $B_z$  (б) над локальным объектом по результатам трехмерного моделирования магнитного поля КЭД.

Значения изолиний даны в мТл.

На рис. 5 представлены результаты расчетов остаточного магнитного поля 8-лучевого КЭД вдоль профиля по координате  $Y$  при  $X = 300$  м (система координат и КЭД показаны на рис. 3, а). Горизонтальная компонента остаточного поля не превышает  $30 \cdot 10^{-9}$  мТл; вертикальная компонента на несколько порядков меньше, и ее значения невозможно показать в масштабе графиков на рис. 5.

Очевидно, остаточное магнитное поле реального КЭД зависит не только от числа образующих его линий, но и от погрешностей, возникающих при раскладке линий на местности. Предположим, что один из электродов (верхний на рис. 4) смещен вправо на 1 м. Согласно расчетам, в этом случае горизонтальное поле остается практически тем же самым, что и в отсутствие погрешности; вертикальное поле изменится, однако его абсолютные значения остаются малыми (рис. 6).

### СРАВНЕНИЕ ПОЛЕЙ КЭД И ЛИНИИ

Очевидно, для того чтобы сравнить возможности КЭД и заземленной линии применительно к магнитным (ММР, МПР) измерениям, необходимо оценить нормальное и аномальное магнитные поля заземленной линии.

Горизонтальную компоненту нормального поля линии можно оценить с помощью выражения, определяющего магнитное поле точечного заземления в воздухе (начало координат в точке заземления, постоянный ток) [Заборовский, 1963]:

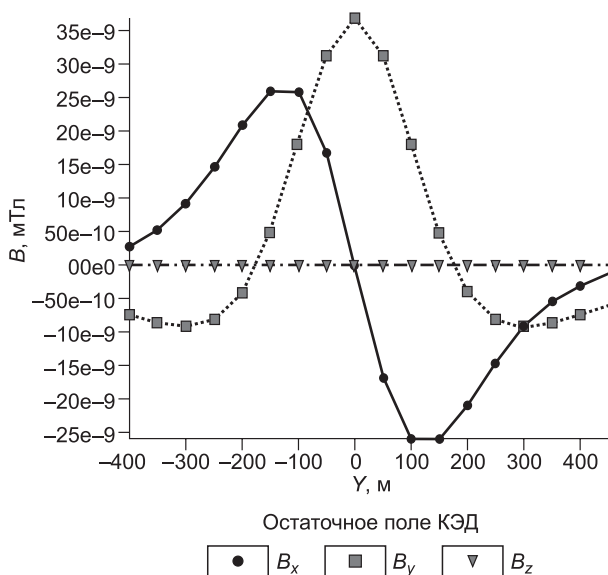
$$H_\phi = \frac{I}{4\pi r}. \quad (4)$$

В расчетах будем использовать удаление в 300 м и ток в 1 А. Для оценки вертикальной компоненты воспользуемся формулой для магнитного поля бесконечно длинного прямого провода, которую легко получить из (2):

$$H_z = \frac{I}{2\pi r}. \quad (5)$$

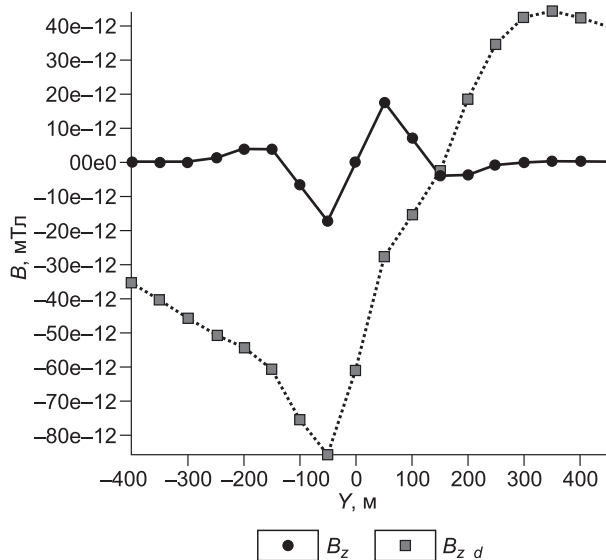
**Значения индукции магнитных полей**

Магнитное поле Земли ( $B_z$ ), мТл	Горизонтальное магнитное поле заземления ( $B_\phi$ ), мТл	Вертикальное магнитное поле линии ( $B_z$ ), мТл	Горизонтальное магнитное поле КЭД ( $B_\phi$ ), мТл	Вертикальное магнитное поле КЭД ( $B_z$ ), мТл	Аномальное магнитное поле неоднородности ( $B_\phi$ и $B_z$ ), мТл
$6 \cdot 10^{-2}$	$300 \cdot 10^{-9}$	$600 \cdot 10^{-9}$	$30 \cdot 10^{-9}$	$0.02 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$



**Рис. 5.** Остаточная магнитная индукция 8-лучевого КЭД вдоль линии  $X = 300$  м (см. рис. 3).

Радиус КЭД 100 м; суммарный ток в линиях, образующих КЭД, равен 1 А.



**Рис. 6.** Остаточная магнитная индукция  $B_z$  вдоль линии  $X = 300$  м 8-лучевого КЭД при точном ( $B_z$ ) и смещенном ( $B_{z_d}$ ) положениях одного из электродов.

Для оценки аномального магнитного поля от заземленной электрической линии желательно провести «полноценное» трехмерное моделирование, аналогичное тому, которое сделано выше для КЭД. Однако можно предположить, что для одного и того же объекта (при одинаковом удалении от источника) аномальное магнитное поле определяется преимущественно током, поступающим в землю через заземления и в меньшей степени зависит от положения заземлений. Поэтому, учитывая приведенные выше результаты, примем оценочное значение  $10^{-9}$  мТл для вертикальной и горизонтальной компоненты аномального поля КЭД и линии.

Наконец, можно свести вместе значения индукции магнитного поля (приведенные к току 1 А в источнике), создаваемой заземлениями, линией, КЭД и проводящей неоднородностью. Для сравнения в таблице также приводится типичное для средних широт значение индукции геомагнитного поля.

Как следует из таблицы, применение 8-лучевого КЭД позволяет в 10 раз уменьшить прямое горизонтальное поле источника и в 10 000 раз (!) прямое вертикальное поле. Как и в случае использования в качестве источника линии, при изучении горизонтальной компоненты магнитного поля с помощью КЭД из наблюдаемого поля необходимо вычесть нормальное. Однако отношение аномального поля к нормальному за счет использования КЭД улучшается на порядок. При изучении вертикальной компоненты нормальное поле КЭД примерно на два порядка меньше по сравнению с аномальным, тогда как в случае источника в виде линии нормальное поле превосходит аномальное почти на три порядка! Очевидно, в случае использования КЭД отношение сигнал/помеха можно повысить за счет увеличения числа образующих КЭД радиальных линий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В принципе, применение кругового электрического диполя решает основную проблему метода сопротивлений с измерением постоянного магнитного поля. Хотя практическая реализация КЭД возможна лишь с некоторой погрешностью, его использование в методе MMR позволяет существенно повысить отношение аномального поля к нормальному. Отметим, что сказанное по поводу метода MMR остается в силе применительно к методу MIP.

## ЛИТЕРАТУРА

- Заборовский А.И.** Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963, 423 с.
- Кожевников Н.О., Камнев Я.К., Казанский А.Ю.** Анализ погрешностей измерения частотно-зависимой магнитной восприимчивости при изучении магнитной вязкости геологических сред (на примере моста Bartington MS2) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (4), с. 650—659.

**Куликов А.В., Шемякин Е.А.** Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М., Недра, 1978, 157 с.

**Могилатов В.С.** Импульсная геоэлектрика. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 2014, 180 с.

**Могилатов В.С., Злобинский А.В.** Поле кругового электрического диполя (КЭД) при постоянном токе // Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 1995, № 11, с. 25—29.

**Могилатов В.С., Злобинский А.В.** Свойства кругового электрического диполя как источника поля для электроразведки // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (11), с. 1692—1700.

**Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М.** Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 2011, № 2, с. 3—14.

**Dentith M., Mudge S.T.** Geophysics for the mineral exploration geoscientists. Cambridge University Press, 2014, 516 p.

**Edwards R.N., Nabighian M.N.** The magnetometric resistivity method / Ed. M.N. Nabighian // Electromagnetic methods in applied geophysics, V. 2, 1991. Application: Parts A and B. Society of Exploration Geophysicists, Investigations in Geophysics, 3. p. 47—104.

**Mogilatov V.** Excitation of a half-space by a radial current sheet source // Pure Appl. Geophys., 1996, v. 147, № 4, p. 763—775.

**Reynolds J.M.** An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, London, 2nd ed., 2011, 712 p.

**Seigel H.O.** The magnetic induced polarization (MIP) method // Geophysics, 1974, v. 39. p. 321—339.

**Sumner J.S.** Principles of induced polarization for geophysical exploration. Elsevier, Amsterdam, 1976, 277 p.

*Рекомендована к печати 30 марта 2017 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
12 декабря 2016 г.*