

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ КРУГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ (КЭД)

Злобинский А.В.¹, Могилатов В.С.²¹ – Компания «НТК ЗаВет-ГЕО», Новосибирск,² – Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск.

Накоплен значительный опыт применения все еще нового источника электромагнитного поля для индукционной электроразведки – кругового электрического диполя (КЭД). Новизна его заключается в том, что это источник переменного ТМ-поляризованного поля, наземный аналог вертикальной электрической линии. Теория этого источника была вполне развита в последние два десятилетия, но одновременно проводились и полевые работы с применением установки КЭД. В данной работе отражены некоторые новые теоретические аспекты

Ключевые слова: индукционная электроразведка, зондирования становлением, круговой электрический диполь, ТМ-поле, токи смещения

Прошло уже 30 лет с тех пор, как в дополнение к традиционным электроразведочным источникам (токовые петля и линия, рис.1), был предложен принципиально новый источник – круговой электрический диполь (КЭД). Новизна его заключается в том, что это источник переменного ТМ-поляризованного поля (Transverse Magnetic), наземный аналог вертикальной электрической линии. С тех пор теория этого источника была вполне развита. Стало хорошим тоном упоминать в контексте индукционной электроразведки о возможности реализации ТЕ- или ТМ-, или смешанного электромагнитного поля. Применение переменного ТМ-поля в электроразведке есть следующий шаг, избавляющий нас от «нормального» сигнала традиционной электроразведки ЗС.

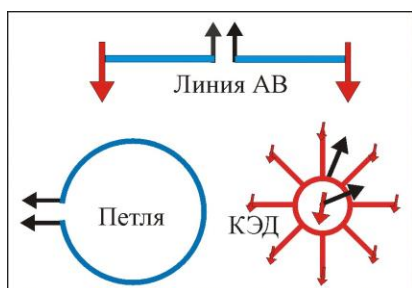


Рис.1. Три источника для индукционной электроразведки

Появились практические методики электроразведки, в которых КЭД является источником электромагнитного поля. Собственно, накоплен уже значительный полевой опыт реализации и эксплуатации этой сложной питающей установки. Предыдущие исследования и опыт работ отражены в соответствующих публикациях (например, [2]). Здесь анализируются некоторые новые теоретические аспекты и уточнены прежние представления.

Магнитное поле КЭД

Если КЭД расположен на дневной поверхности, то нормальное (одномерного происхождения) магнитное поле на дневной поверхности и выше отсутствует. Иногда говорят, что КЭД не имеет собственного магнитного поля (как имеет его токовая петля), а магнитное поле связано только с токами в среде. Однако это утверждение не совсем верно, и, во всяком случае, его следует уточнить.

Рассмотрим, например, частный случай, когда внешний радиус большой (бесконечный). Такую токовую систему можно рассматривать как точечное заземление с радиальным подводом тока. Но известно [1], что точечное заземление обладает магнитным полем, которое имеет вид в воздухе (начало координат в точке заземления, постоянный ток)

$$H_{\varphi}^{\circ} = \frac{I}{4\pi r} \left(1 - \frac{|z|}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right). \quad (1)$$

Значит, поскольку полное поле в воздухе равно 0, радиальный ток тоже имеет магнитное поле, в точности такое же, но с обратным знаком. В земле магнитное поле заземления такое же, как и в воздухе (1), а поле радиального тока меняет знак. Поэтому в земле суммарное магнитное поле КЭД с бесконечным радиусом есть удвоенное значение (1).

Итак, квазистационарное магнитное поле КЭД в одномерной среде присутствует только в проводящих слоях. Причем, если часть разреза отделена непроводящим горизонтом, то поле туда не проникает. Такую ситуацию на дневной поверхности можно рассматривать как полную компенсацию

магнитного отклика горизонтально-слоистого разреза. В этих условиях мы вполне можем рассчитывать зафиксировать слабые сигналы аномалий разного рода. Например, поле локального объекта, выделенного по сопротивлению. Посмотрим, как это выглядит при трехмерном математическом моделировании (метод конечных элементов, Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г.).

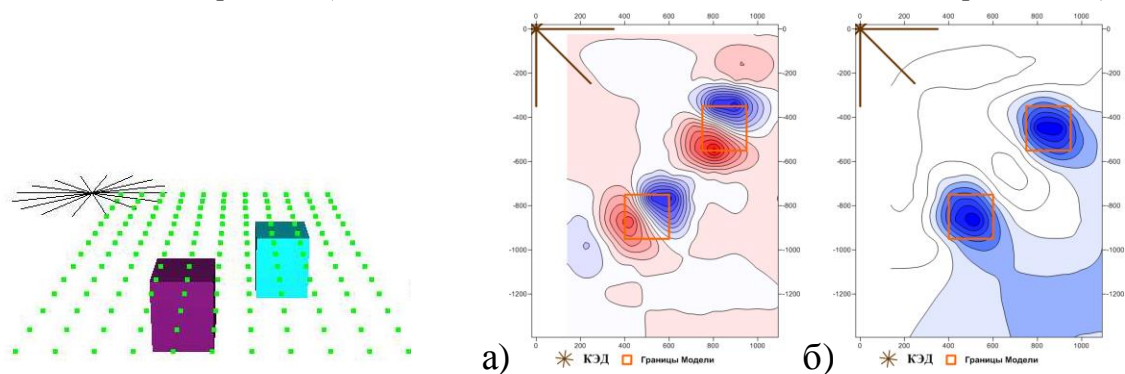


Рис.2. 3D моделирование поля КЭД. Изолинии наблюдаемого сигнала – а- $-dB_z/dt$, б- $-dB_\phi/dt$

Локальные объекты на рис.2 вполне определенно выявляются прямо в измеряемом поле (без всяких интерпретационных процедур. Такую методику иногда подозревают в близости к так называемым методам чистой аномалии, которые имеют весьма скверную репутацию в геоэлектрике. Однако в случае применения КЭД такое обвинение – результат недоразумения. Да, мы измеряем непосредственно поле аномальных объектов, но при этом фиксируется полное поле, которое существует на дневной поверхности. Мы устраиваем источник (КЭД) таким образом, что полное поле во всех магнитных компонентах не содержит отклика от вмещающей толщи. В этом случае проблема влияния нормальной части разреза решается на физическом уровне, а не за счет ограниченной пространственно-временной выборки и фиксации отклика. Разумеется, теперь есть проблемы в точном устройстве источника, но это уже другой вопрос. Надо заметить, что за претензию на детальный трехмерный результат надо платить новыми и более мощными средствами обработки и интерпретации с одной стороны, но также и более совершенным и сложным устройством самого эксперимента. Как бы там ни было, такая методика давно и успешно применяется в рудных и нефтяных работах.

Еще одно замечание. ТМ-поляризация реализуется в чистом виде только в горизонтально-слоистой среде. Однако вполне можно заявить, что горизонтально-слоистого разреза не существует в природе, всегда есть какие-то отклонения. Но с другой стороны, идеальный (воображаемый, кажущийся, эффективный) горизонтально-слоистый разрез существует всегда, вбирая в себя основную массу проводимости разреза. Эта вмещающая среда (ее отклик) не присутствует в магнитном сигнале. Фиксируемый сигнал отражает различного рода отклонения от этой идеальной горизонтально-слоистой модели и подлежит разбраковке и трехмерной интерпретации. Но это, в отличие от традиционных ЗС, происходит уже в условиях скомпенсированного отклика основной проводимости разреза.

Электрическое поле КЭД

Электрическое поле КЭД в одномерной среде имеет компоненты E_r и E_z . На дневной поверхности – только E_r . Это нормальная, одномерная компонента поля КЭД. Наблюдения E_r на дневной поверхности являются, по существу, геоэлектрическим исследованием с использованием ТМ-поляризованного поля. Свойства переменного ТМ-поля уже были достаточным образом обсуждены. С точки зрения обычной индукционной электроразведки, использующей преимущественно ТЕ-поляризацию, свойства эти совершенно необычны и они много обсуждались [2]. Мы здесь рассмотрим вопрос о влиянии тонкого высокоомного горизонта. Как известно, ТМ-поле обладает особой чувствительностью к такому объекту. И это является положительным качеством, если такой горизонт является целевым, и это может быть отрицательным качеством, если такой горизонт перекрывает исследуемые горизонты. В электроразведке на постоянном токе этот вопрос ясен, нижележащая толща становится недоступной для исследования. Но в индукционном режиме (гармоническом или в становлении), рассматривая чистое ТМ-поле, мы должны заново поставить этот вопрос. Нами произведен расчет с учетом токов смещения для модели с изолирующим

горизонтом, представленной на рис.3, и, как не раз случалось при анализе поведения ТМ-поля, был получен поразительный результат. На рис.3 первая кривая – квазистационарная и определяется только верхним слоем. Спад – экспоненциальный. Вторая кривая показывает влияние токов смещения. Это влияние просто критическое. Дальнейшие расчеты показали также резкую зависимость от сопротивления нижнего слоя. Эти расчеты были повторены Персовой М.Г. независимо, методом конечных элементов, так что достоверность результата на рис.3 вполне подтверждена.

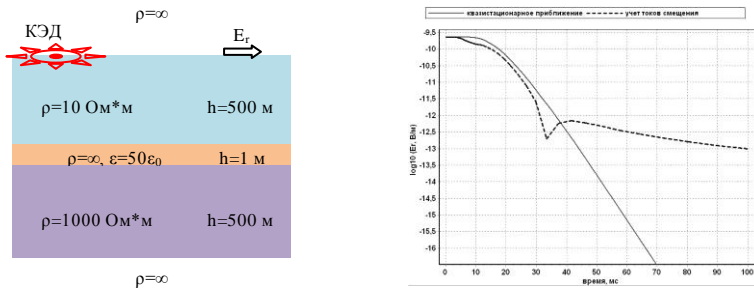


Рис.3. Токи смещения играют существенную роль для ТМ-поля

КЭД и вертикальный электрический диполь (ВЭД)

С самого начала КЭД характеризовался как наземный аналог вертикальной электрической линии (ВЭЛ). Это верно по существу, поскольку и вертикальный электрический диполь, и круговой электрический диполь возбуждают поля только электрического типа, со сходной пространственной структурой распределения токов в среде – в виде тороидальной системы (рис.4а).

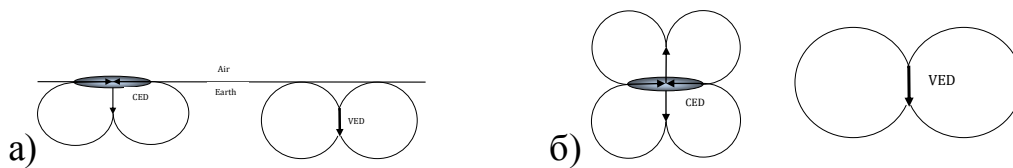


Рис.4. Тороидальные системы токов КЭД и ВЭД. а-у дневной поверхности, б-в глубоком море

Давно показано [2], что гармоническое поле КЭД, размещенного на дневной поверхности, и поле ВЭД, погруженного на глубину h , описываются при условиях $h \ll r$, $|k_0 r| \ll 1$ и $|\hat{\sigma}_1| \gg \varepsilon_0 \omega$ ($k_j^2 = \mathbf{i} \omega \hat{\sigma}_j \mu_0$, $\hat{\sigma}_j = \sigma_j + \mathbf{i} \omega \varepsilon_j$) одной и той же формулой (вектор-потенциал):

$$A_z = \frac{C}{2\pi} \cdot \frac{z}{R^3} \cdot (1 + k_1 R) \cdot \exp(-k_1 R), \quad (2)$$

где $R = \sqrt{r^2 + z^2}$, а коэффициент $C = Idzh$ в случае ВЭД и $C = I_0 b^2 / 4$ в случае КЭД. Причем аналогия между КЭД и ВЭД весьма устойчива и распространяется на слоистую среду и на режим установления. Например, в двухслойной среде с изолирующим основанием в поздней стадии, при $t \rightarrow \infty$ для ВЭД и КЭД имеем [2]:

$$E_r(t) \cong C \cdot \frac{r}{\pi \sigma h^5} \cdot \left(\frac{\mu_0 \sigma h^2}{2t} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 t}{\mu_0 \sigma h^2} \right), \quad (3)$$

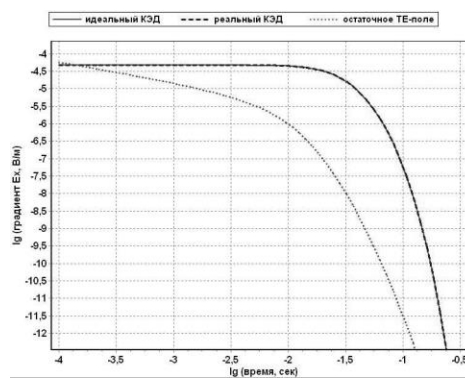
Однако, как обратил наше внимание Дж.Р.Уэйт, формула (2) утверждает, что КЭД и ВЭД ведут себя как квадруполь в данном случае. Причем, КЭД – «истинный» квадруполь, а ВЭД становится квадруполем из-за близости дневной границы. Предлагалось даже именовать КЭД как ЦЭК (Central Electric Quadrupole), что вряд ли целесообразно с практической точки зрения.

Но при погружении в глубокое море ситуация меняется. В однородном пространстве поле ВЭД становится именно полем диполя, а вот поле КЭД остается по-прежнему квадрупольным (рис.4б). ВЭД образует одну тороидальную систему токов, а КЭД образует две тороидальные системы – верхнюю и нижнюю. Нестационарное поле погруженного КЭД может вести себя весьма сложным

образом из-за эволюции и взаимодействия двух тороидальных систем вторичных токов.

Реальный и идеальный КЭД

Реализация на практике питающей установки КЭД может быть различной в зависимости от размеров. Небольшая установка может быть реализована на базе металлического диска или сетки с центральным заземлением и с равномерным заземлением по краям. Равномерное заземление по краям, впрочем, обеспечить сложно. Возможно, в этом случае лучше вообще отказаться от внешнего заземления, предполагая малоглубинную высокочастотную методику. В больших масштабах реализовать КЭД можно с помощью равномерно распределенных радиальных линий. Практически используют 8-лучевую установку. Здесь мы отвлекаемся от технических проблем (точная геометрия и равенство токов в лучах), а рассмотрим только принципиальный вопрос – соответствие идеального источника и источника, составленного из восьми токовых радиальных линий. Вопрос этот не простой, и тонкость состоит в том, что эти источники с точки зрения ТМ-ТЕ-подхода – разные. Идеальный КЭД по определению источник ТМ-поля. А реальный (8-лучевой) – источник



смешанный, в его поле есть «недобитая» ТЕ-мода. Понятно, что она существенна на ранних временах становления вблизи источника и, вроде бы, должна быть мала на более поздних временах в сравнении с ТМ-модой. Но ведь мы знаем, что ТЕ-мода имеет более длительный процесс становления, и на самых поздних временах будет ревалорировать. Практика и теория, однако, показывают, что в значительном, практически используемом диапазоне ТЕ-моду можно считать пренебрежимо малой. В некоторых случаях, в рудных работах, влияние индуктивной составляющей все же заметно, и его необходимо учитывать на ранних временах посредством математического (одномерного) моделирования. На рис.5

Рис.5. Реальный и идеальный круговой электрический диполь

приведены три кривые становления для радиального электрического градиента. Сравниваются кривые для идеального и 8-лучевого КЭД, а также приведена кривая

для части сигнала, обусловленной ТЕ-полем.

Заключение

Теоретические исследования и практическое применение питающей установки – круговой электрический диполь показывают новые большие возможности для развития электроразведочного метода. Это, конечно, определяется свойствами нестационарного ТМ-поляризованного поля. ТМ-поле мало изучались в сравнении с ТЕ-полем, которое есть физическая основа традиционной электроразведки и которым занимались тысячи исследователей на протяжении десятилетий. Традиционные зондирования становлением, разумеется, не отменяются, а только очень существенно дополняются при использовании нестационарного ТМ-поля для решения новых задач.

1. Заборовский А.И. Электроразведка. Гостоптехиздат. М.,1963. 423 с.
2. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Учеб. пособие НГУ. Новосибирск, 2002. 208 с.