

СВОЙСТВА КРУГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ КАК ИСТОЧНИКА ПОЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В.С. Могилатов^{1,3}, А.В. Злобинский²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, ул. Академика Коптюга, 3, Россия

² «НТК ЗаВеТ-ГЕО», 630102, Новосибирск, ул. Восход, 26/1, оф. 26, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

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. Эти исследования были опубликованы, и мы надеемся, что наши результаты помогли формированию общего взгляда на индукционную электроразведку как на метод, использующий по сознательному выбору экспериментатора ТЕ- или ТМ-поле. В данной работе отражены некоторые новые теоретические аспекты, а также специфический опыт полевого применения установки КЭД.

Индукционная электроразведка, зондирования становлением, круговой электрический диполь, ТМ-поле, зондирования вертикальными токами.

A CIRCULAR ELECTRIC DIPOLE: A TRANSMITTER FOR TEM SURVEYS

V.S. Mogilatov and A.V. Zlobinsky

Much experience has been gained lately in the use of a radial current source, the so-called circular electric dipole (CED), as a transmitter in transient electromagnetic (TEM) surveys. CED is a source of alternating transverse magnetic (TM) polarized field, a surface analog of a vertical electrical line in VES. In the course of two recent decades, the method has been developed theoretically and tested through the field practice. The respective published results are expected to provide an idea of TEM soundings with the optional use of either TE or TM mode. In this paper we report some new theoretical aspects and share our field experience of surveys with an CED system.

TEM survey, circular electric dipole, TM field, vertical electric sounding

ВВЕДЕНИЕ

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, наземный аналог вертикальной электрической линии. С тех пор теория этого источника была вполне развита. Стало обычным 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. Это обычный ход прогресса в экспериментальных исследованиях. Когда-то основным сигналом был сигнал от неотключаемого источника. Он стал мешать при решении более тонких задач, превратился в мешающий фон, и электроразведчики избавились от него, отключив источники и регистрируя процесс становления. Теперь речь идет уже о том, что устанавливающийся сигнал традиционных ЗС, завися-

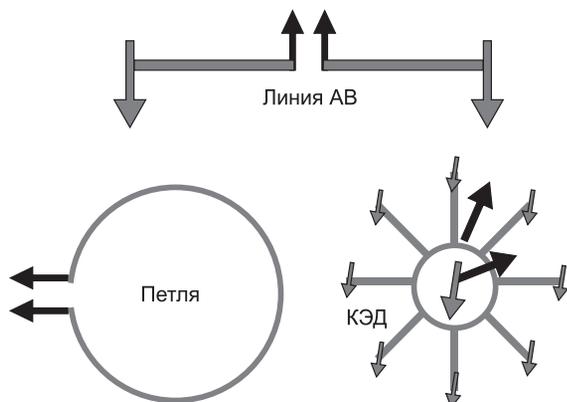


Рис. 1. Три источника для индукционной электроразведки.

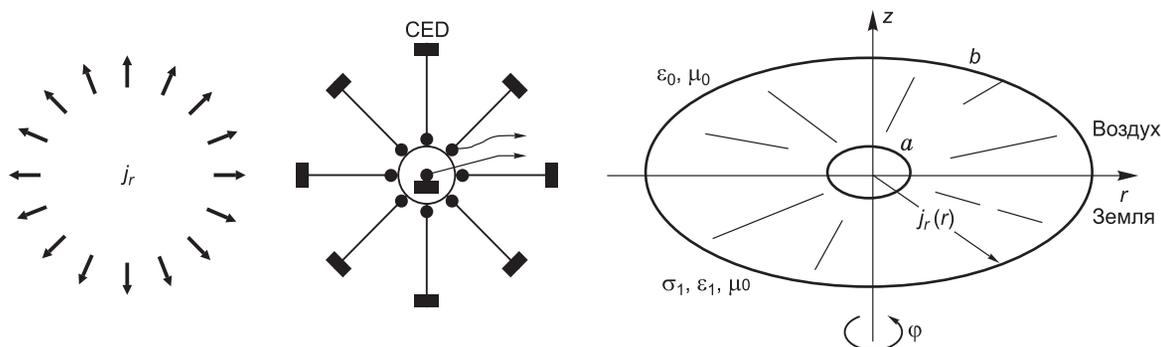


Рис. 2. Теоретический, реальный и идеальный круговой электрический диполь.

Пояснения см. в тексте.

ций от всей вмещающей толщи, стал во многих случаях фоном, помехой. ТМ-поле позволяет на физическом уровне убрать этот фон, как темное стекло, и предлагает увидеть новые сигналы, и не просто слабые, а иногда и новой природы.

Итак, появились практические методики электроразведки, в которых КЭД является источником электромагнитного поля. Накоплен уже значительный полевой опыт реализации и эксплуатации этой сложной питающей установки. Предыдущие исследования и опыт работ отражены в соответствующих публикациях (например, [Могилатов, 2002]). В этой работе анализируются некоторые аспекты применения КЭД. Возбуждение чистого ТМ-поля предъявляет довольно жесткие условия к геометрии источника. Другой ряд вопросов относится к системе измерений компонент поля, которые имеют совершенно другие конфигурацию и значение, нежели при возбуждении традиционными источниками. Кроме того, уточнены некоторые теоретические представления и обсуждаются перспективы.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Будем называть круговым электрическим диполем используемое в теоретических описаниях распределение поверхностного стороннего радиального тока с плотностью (поверхностной, в А/м!), отличной от нуля на окружности радиуса r_0 :

$$j_r^{cm}(r) = \frac{I}{2\pi r} \cdot [U(r - r_0 + dr_0/2) - U(r - r_0 - dr_0/2)], \quad (1)$$

где $U(x)$ — функция Хевисайда (рис. 2, слева), а также азимутально-однородный радиальный ток, заземленный по окружностям с радиусами $a < b$ (см. рис. 2, правый). Понятно, что наибольшее практическое значение имеет случай центрального заземления ($a = 0$). Кроме того, имеется практическая реализация КЭД посредством конечного набора линий (см. рис. 2, в центре).

В одномерной (горизонтально-слоистой) среде такой источник возбуждает в цилиндрической системе координат электрические компоненты E_r , E_z и магнитную H_ϕ , что и определяет КЭД как источник ТМ-поля (Transverse Magnetic).

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 его следует уточнить.

Рассмотрим частный случай, когда внешний радиус большой (бесконечный). Такую токовую систему можно рассматривать как точечное заземление с радиальным подводом тока. Но известно [Заборовский, 1963], что точечное заземление обладает магнитным полем, которое имеет вид в воздухе (начало координат в точке заземления, постоянный ток)

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

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

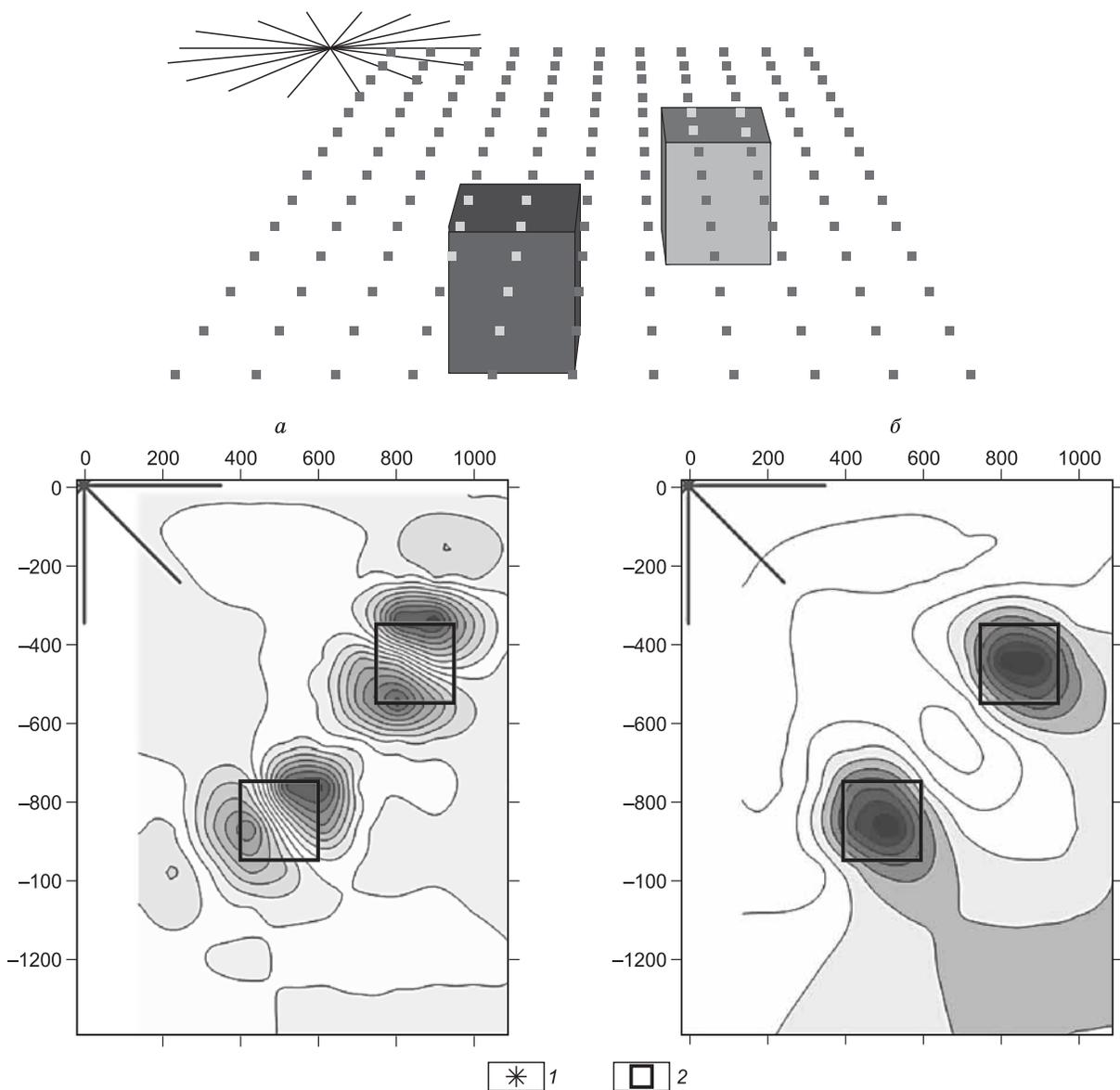


Рис. 3. Трехмерное моделирование магнитного поля КЭД. Карты изолиний наблюдаемого сигнала: $a — dB_z/dt$, $b — dB_\phi/dt$.

$1 —$ КЭД, $2 —$ границы модели, координаты даны в метрах.

(2), а поле радиального тока меняет знак. Поэтому в земле суммарное магнитное поле КЭД с бесконечным радиусом есть

$$H_\phi = \frac{I}{2\pi r} \left(1 - \frac{|z|}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right). \quad (3)$$

Итак, квазистационарное магнитное поле КЭД в одномерной среде присутствует только в проводящих слоях. Причем, если часть разреза отделена непроводящим горизонтом, то квазистационарное 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 зафиксировать слабые сигналы аномалий разного рода, например, поле локального объекта, выделенного по сопротивлению. Посмотрим, как это выглядит при трехмерном математическом моделировании.

На рис. 3 представлена модель и карты изолиний наблюдаемого поля для двух компонент магнитной индукции. Объекты отчетливо выделяются в условиях отсутствия отклика вмещающей среды.

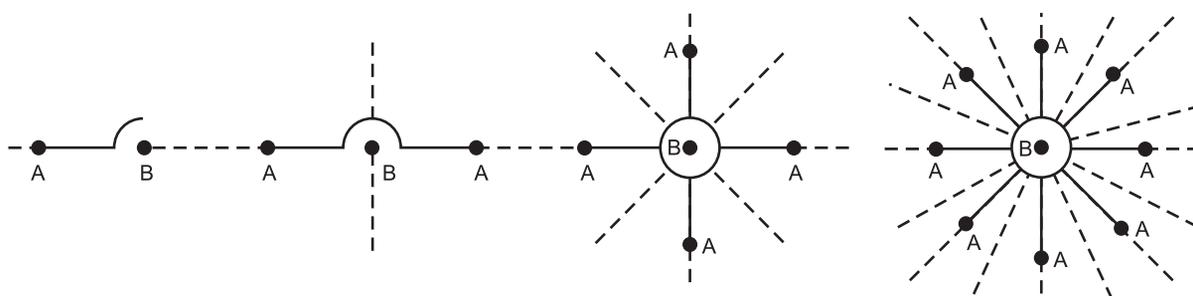


Рис. 4. «Обнуление» нормального одномерного фона.

Такую методику иногда считают близкой к так называемым методам чистой аномалии, которые имеют весьма скверную репутацию в геоэлектрике, и вполне заслуженно. В методах чистой аномалии определенным образом регистрируется только некоторая (аномальная) часть полного поля, а полное поле является помехой. Проблема в том, что полное поле так или иначе «пролезает» в наблюдаемый сигнал, и в этом слабость метода чистой аномалии. Однако в случае применения КЭД мы устраиваем сам источник 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. Претендуя на детальный трехмерный результат, приходится платить новыми и более мощными средствами обработки и интерпретации, а также и более совершенным и сложным устройством самого эксперимента.

Приведем еще интересный умозрительный эксперимент, в котором настоящий метод чистой аномалии трансформируется в нашу методику. Итак, мы желаем измерять только отклик от неоднородности в разрезе. Возьмем для этого в качестве источника линию АВ и будем измерять магнитное поле на оси. Это, безусловно, метод чистой аномалии. Констатируем, что магнитное поле равно нулю на оси линии, которая является линией резкого перехода через 0, что создает критические условия для измерений. Кроме того, таких измерений мало по площади. Присоединим вторую питающую линию, включив ее навстречу первой (рис. 4) так, что нормальное магнитное поле будет равно 0 уже на четырех направлениях от центрального электрода. Крестообразное расположение четырех линий даст восемь направлений с нулевым магнитным полем и т.д. Практически можно ограничиться восемью питающими лучами, что обеспечивает нулевой нормальный фон по 16 направлениям. Но важно также, что хотя эти радиальные профили по-прежнему есть линии перехода через 0, но значения остаточного магнитного поля между ними становятся пренебрежимо малы, и можно устраивать уже площадные измерения полного поля, генерируемого неоднородностями разреза. Мы ушли от метода чистой аномалии и опять-таки получили питающую установку КЭД.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КЭД

Электрическое поле КЭД в одномерной среде имеет компоненты E_r и E_z (в цилиндрической системе координат), 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. Именно КЭД дает возможность с дневной поверхности возбуждать переменное поле такой поляризации. Свойства переменного ТМ-поля уже были достаточным образом обсуждены [Могилатов, 2002]. С точки зрения обычной индукционной электроразведки, использующей преимущественно ТЕ-поляризацию, свойства эти совершенно необычны. Мы, однако, здесь выделим только вопрос о влиянии тонкого высокоомного горизонта. Как известно, ТМ-поле обладает особой чувствительностью к такому объекту. Это является положительным качеством, если такой горизонт является целевым (например, нефтенасыщенный коллектор), и это может быть отрицательным качеством, если такой горизонт перекрывает исследуемые горизонты, и более того, является полным изолятором. В электроразведке на постоянном токе этот вопрос ясен — нижележащая толща становится недоступной для исследования. Но в индукционном режиме (гармоническом или в становлении) вопрос сложнее. Однако квазистационарное приближение мы не можем применять внутри слоя-изолятора и должны учесть токи смещения. Вопрос об учете токов смещения в традиционной электроразведке (ТЕ-электроразведке) давно решен окончательно и бесповоротно, влияние токов смещения всегда пренебрежимо мало в присутствии ТЕ-поля (индуктивного).

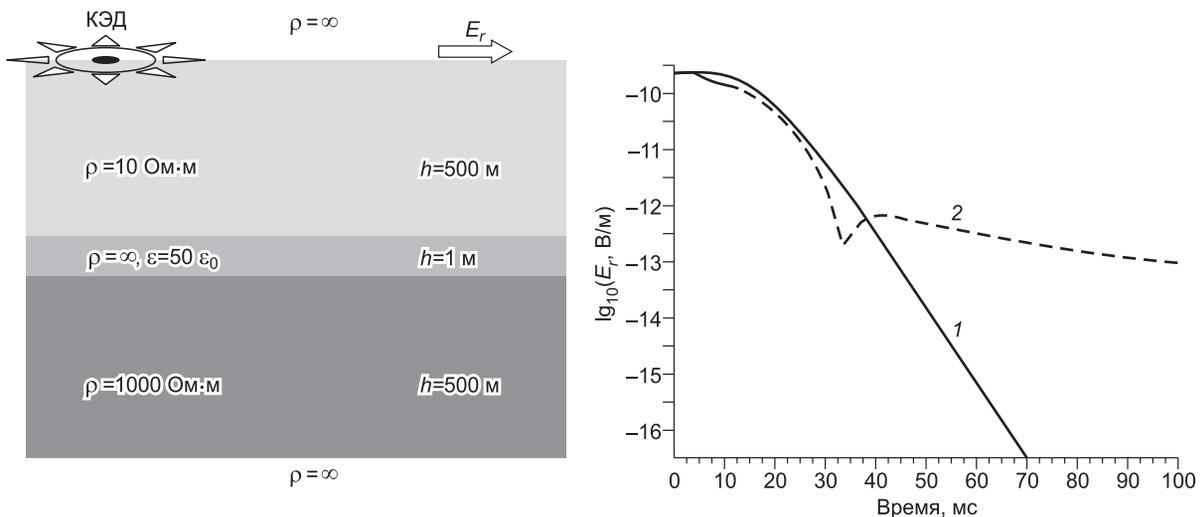


Рис. 5. Токи смещения играют существенную роль в случае ТМ-поля.

1 — квазистационарное приближение, 2 — учет токов смещения.

Но 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. 5, и, как не раз случалось при анализе поведения ТМ-поля, был получен поразительный результат. На рис. 5 сравниваются две кривые становления. Первая — 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. Мы были вынуждены искать подтверждение нашим расчетам. Независимые расчеты были выполнены М.Г. Персовой методом конечных элементов, так что достоверность результата на рис. 5 вполне подтверждена.

КЭД И ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ (ВЭД)

С самого начала изучения КЭД характеризовался как наземный аналог вертикального электрического диполя (ВЭД). Это помогло воспринять новый источник и позволяло соотнести с традицией, к которой все-таки принадлежит и ВЭД. 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. 6, а).

Еще в работе [Mogilatov, 1996] (при участии Дж.Р. Уэйт) показано, что гармоническое поле КЭД, размещенное на дневной поверхности, и поле ВЭД, погруженное на глубину h , описываются при условиях $h \ll r$, $|k_0 r| \ll 1$ и $|\hat{\sigma}_1| \gg \epsilon_0 \omega$ ($k_j^2 = i\omega \sigma_j \mu_0$, $\tilde{\sigma}_j = \sigma_j + i\omega \epsilon_j$) одной и той же формулой (вектор-потенциал):

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

где $R = \sqrt{r^2 + z^2}$, а коэффициент $C = Idzh$ в случае ВЭД и $C = I_0 b^2 / 4$ в случае КЭД.

Однако, как обратил наше внимание Дж.Р. Уэйт (он даже опубликовал письмо в редакцию по этому поводу, [Wait, 1997]), формула (3) утверждает, что КЭД и ВЭД ведут себя как квадруполь в данном случае. Причем КЭД — «истинный» квадруполь, а поле ВЭД становится квадрупольным из-за близости дневной границы. Предлагалось даже именовать КЭД как ЦЭК (Central Electric Quadrupole), что вряд ли целесообразно с практической точки зрения.

Тем не менее, если КЭД расположен на дневной поверхности, а ВЭД — вблизи нее, то 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 [Могилатов, 2002]:

$$E_r(t) \cong C \cdot \frac{r}{\pi \sigma h^5} \cdot \left(\frac{\mu_0 \sigma h^2}{2t} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 t}{\mu_0 \sigma h^2} \right), \quad (4)$$

где C для КЭД и ВЭД определен выше.

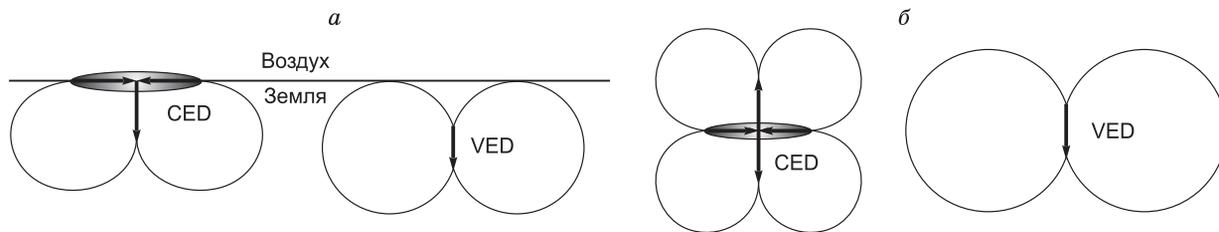


Рис. 6. Тороидальные системы токов КЭД и ВЭД:

a — у дневной поверхности, *б* — в море.

Однако при погружении в глубокое море ситуация меняется. В однородном пространстве поле ВЭД становится именно полем диполя, теперь [Уэйт, 1982]:

$$A_z = \frac{Idz}{4\pi R} \cdot \exp(-k_1 R), \quad (5)$$

а вот поле КЭД остается по-прежнему квадрупольным (см. рис. 6, б). ВЭД образует одну тороидальную систему токов, а КЭД образует две тороидальные системы — верхнюю и нижнюю. Так что с погружением в глубокое море свойства ВЭД и КЭД могут сильно различаться. Особенно это проявится в режиме установления. Поле 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 различна в зависимости от размеров. Небольшая установка может быть реализована на базе металлического диска или сетки с центральным заземлением и с равномерным заземлением по краям, которое, 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 непростой, 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 превалировать. 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. 7 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. Кривые для идеального и реального КЭД в этом примере совпадают. Вообще количественная оценка аппроксимации идеальной установки набором линий сильно зависит от размеров приемно-питающей установки, от геоэлектрических условий, от

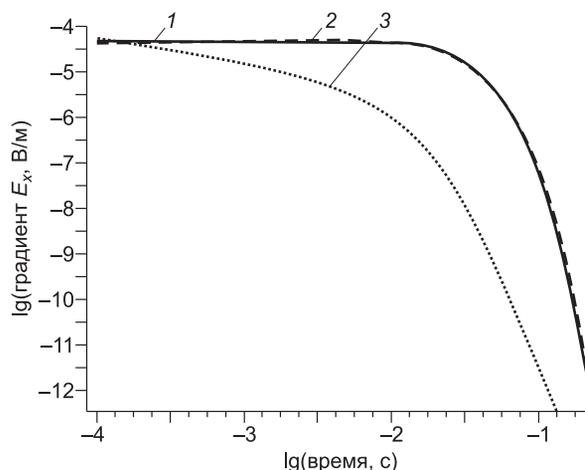


Рис. 7. Реальный и идеальный круговой электрический диполь.

1 — идеальный КЭД, 2 — реальный КЭД, 3 — остаточное ТЕ-поле.

диапазона регистрации сигнала, а также от регистрируемой компоненты (магнитная или электрическая). Решение вопроса состоит в наличии в составе интерпретационного матобеспечения соответствующих процедур расчета процесса становления для идеального и реального КЭД в конкретных геоэлектрических условиях. Такие процедуры применяются при проектировании работ и при обработке результатов. Кривые на рис. 7 как раз получены с их использованием.

Разумеется, основное, принципиальное назначение такой сложной электроразведочной установки, как КЭД, состоит в реализации ТМ-поляризованного электромагнитного поля. В этом ее главный смысл. Однако дополнительно в руках электроразведчиков оказываются весьма интересные возможности, связанные с оперативным изменением конфигурации источника посредством управления токами в лучах. Набор данных, полученных варьированием источника, повышает определенность обратной задачи. В частности, эти возможности на практике использовались для зондирования с разноориентированными питающими линиями.

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ РЕАЛИЗАЦИИ КЭД В ПОЛЕ

Выше мы сравнили идеальный источник с 8-лучевой установкой КЭД, выполненной идеально — с равными лучами, через равные углы и с равными токами. На местности, конечно, это реализуется лишь с некоторыми приближениями, а иногда и с ошибками, которые обнаруживались уже после проведения измерений. Рассматривая КЭД как набор токовых линий, можно оценить влияние разного рода дефектов и учесть это влияние в данных. Хотя КЭД применяется обычно с целью изучения трехмерных структур, влияние дефектов можно оценить и учесть моделированием в одномерной вмещающей толще. Характерные дефекты следующие.

1. Отклонение тока в одном из лучей (из-за разрегулировки блока управления и контроля). Этот дефект равносильен появлению дополнительного (по отношению к «правильному» КЭД) источника — заземленной линии с малым (величина дефекта) током.

2. Длина луча не равна остальным. Это эквивалентно появлению дополнительной (по отношению к правильному КЭД) токовой линии с током луча, но короткой (длина дефекта).

3. Отклонение от точного направления.

Надо заметить, что КЭД требует строгой геометрии и равенства токов. Эти требования возникают в силу того физического явления, которое мы реализуем и используем, — ТМ-поляризацию геоэлектромагнитного поля. Вместе с тем на основании большого полевого опыта и трехмерного полевого опыта можно заявить, что тороидальная система вторичных токов, присущая ТМ-полю, достаточно (для производства зондирования) устойчива за счет взаимодействия электрических и магнитных компонент.

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА И НЕОДНОМЕРНОСТИ ВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ

Влияние рельефа, естественно, всегда имеется. Если этот вопрос не обсуждается в каком-либо методе электроразведки, то такой метод просто груб. При использовании КЭД влияние рельефа должно учитываться и, как правило, для каждой работы проводится такой анализ посредством численного моделирования. Обычно, начиная с некоторых времен, влиянием рельефа можно все-таки пренебречь. Был случай, когда неудачно расположенный источник, заставил для части площади вводить поправку на рельеф для всех измеренных времен. Ситуация, разумеется, сильно зависит от того, насколько значителен исследуемый объект.

Отдельный вопрос связан с общим наклоном границ вмещающей толщи. Если мы исследуем слабоконтрастные объекты, то наблюдается превалирование влияния генерального поднятия (опускания) на сигнал, начиная с некоторого времени измерений. Сигнал, обусловленный влиянием генерального поднятия слоев, хорошо выявляется в полевом материале при измерениях $\partial B_z / \partial t$ компоненты. Характерным признаком является устойчивое по времени площадное деление сигнала на две антисимметричные части — положительную и отрицательную, при этом ось проходит через центр КЭД. Эту пространственную тенденцию в сигнале можно удалить после моделирования. Иногда она не мешает выявлять локальные объекты.

Наконец, отметим особый случай неоднородности вмещающей толщи, который на практике может встретиться (и встречался-таки). Расположив КЭД рядом с заземленным металлическим трубопроводом, мы получим сильнейшую помеху в виде дополнительного эффективного сильного источника, не отключаемого к тому же с началом регистрации. Особенно опасны трубопроводы в направлении, близком к радиальному по отношению к центру КЭД.

Можно сделать еще одно общее замечание. ТМ-поляризация реализуется в чистом виде только в горизонтально-слоистой среде. Но, становясь на крайнюю точку зрения, можно сказать, что горизонтально-слоистого разреза не существует в природе, всегда есть какие-то отклонения. Однако возможна и другая точка зрения, что, напротив, идеальный (воображаемый, кажущийся, эффективный) *горизон-*

тально-слоистый разрез существует всегда, вбирая в себя основную массу проводимости разреза. Эта вмещающая среда (ее отклик) не присутствует в магнитном сигнале непосредственным образом. 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.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ

Электрическое поле КЭД на дневной поверхности является «нормальным», одномерного происхождения. В цилиндрической системе координат это компонента E_r . Данные измерений приемной радиальной линией позволяют провести послойную интерпретацию. Однако возможность одномерной интерпретации сильно ограничена из-за чувствительности электрического сигнала к геоэлектрическим неоднородностям. Почему это происходит? В режиме становления спад нормальной компоненты E_r (как компоненты ТМ-поля) происходит быстрее, чем установление аномального (от неоднородности) сигнала, который индуцируется вторичными аномальными горизонтальными токами и, следовательно, определяется свойствами долгоживущего ТЕ-поля. Так что электрические измерения на практике могут хорошо дополнить методику с магнитным приемом от КЭД по части выявления локального трехмерного объекта. Такие работы проводились недавно в Якутии на кимберлитовых трубках. Более того, трехмерное математическое моделирование для моря показало, что аномальные магнитные поля слишком слабы, а сигнал электрический — значителен и все-таки содержит хорошо выделяемую аномальную составляющую.

Другое осложнение, которое также можно обратить в свою пользу, состоит в том, что электрический сигнал от КЭД (опять-таки по причине быстрого спада электродинамического процесса) может содержать значительный эффект ВП. В этом плане такие измерения даже более эффективны, чем с классической установкой АВМН.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОЕКТЫ

Электромагнитные зондирования с использованием питающей установки КЭД пока еще не нашли широкого применения, и потому не все возможности, связанные с замечательными свойствами нестационарного поля ТМ-поляризации, использованы на практике.

Например, фактически применяется импульсное питание КЭД как наиболее современное. Режим установления позволяет «убрать» источник на время измерения. Однако как раз для КЭД это не имеет особого значения при измерении магнитной составляющей, поскольку даже в гармоническом режиме прямое поле компенсируется. Использование частотного варианта упростило бы силовую аппаратуру.

Далее, на высоких частотах (или в сверхкороткой стадии установления) нет нужды заземлять внешние концы радиальных линий. Таким образом, можно рассмотреть перспективы создания достаточно технологичного, малоглубинного метода (диэлектрических?) зондирований.

Другая область, где было бы интересно применить зондирования посредством ТМ-поля — морские геоэлектрические исследования. Для полей традиционных источников с преобладанием магнитной моды слой морской воды — серьезнейшая помеха. Единственный известный случай успешного приме-

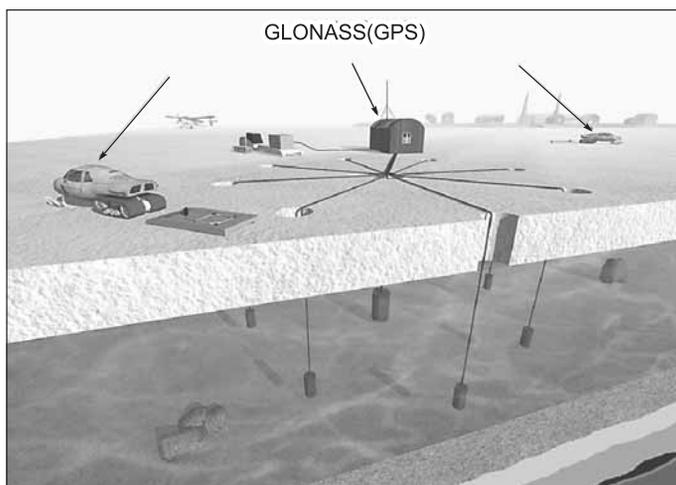


Рис. 8. Арктический проект.

нения традиционных зондирований — так называемый метод CSEM, в котором сильно разнесенной установкой АВМН удастся весьма успешно определять целевой горизонт повышенного сопротивления (за счет поглощения «нормального» поля морской водой). Однако это работает в условиях только глубокого (более 1000 м) моря с использованием весьма больших разносов (до 15 км). Применение кругового электрического диполя могло бы изменить ситуацию, поскольку ТМ-поле не определяется суммарной продольной проводимостью ни в какой стадии и чувствительно к объекту повышенного сопротивления независимо от глубины моря.

Есть, кстати, возможная область применения КЭД в морской геофизике, где проблема размещения и перемещения сложной установки разрешается. Существует так называемый «Арктический проект», по которому огромная установка КЭД размещается на многолетнем льду и дрейфует подобно известным станциям СП. Приводим здесь поясняющий рисунок (рис. 8).

Система наблюдения складывается из электрических приемников в виде фиксированных, заземленных в воде, горизонтальных и вертикальных линий, а также из площадной, оперативно выполняемой мобильными индуктивными датчиками системы измерений магнитного поля. Здесь намечается альтернатива — делать ли непрерывные измерения (что едва ли возможно) или же проводить цикл измерений, привязывать его к определенной точке и повторять его через некоторое время (сутки — это 5—7 км дрейфа). Этот вопрос предстоит изучить. Так или иначе, измерениями может быть охвачена полоса вдоль траектории источника шириной в десять радиусов. Итак, исходя из радиуса КЭД 15 км, мы получаем при общей длине дрейфа в 4000 км (средний показатель по советским СП) 600 000 кв.км обследованной площади в виде весьма вытянутого извилистого коридора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полевое применение КЭД началось двадцать лет назад и продолжается сейчас. Этот опыт показал, что предпочтения, которые теория отдает этому источнику (и вертикальному электрическому диполю) как источнику нестационарного ТМ-поля, на самом деле реализуются на практике надежным и универсальным способом, в отличие от того же ВЭД. Его применение означает создание нового направления в электроразведке, включающего несколько методик. Использование КЭД имеет совершенно ясный теоретический аспект в виде свойств переменного ТМ-поля. Но также есть практический аспект в виде компенсации нормального (одномерного) магнитного отклика на дневной поверхности. Это очень серьезное обстоятельство, которое еще далеко не оценено по достоинству. Этот фактор позволяет проводить плотные площадные наблюдения от фиксированного источника и выявлять объекты в наблюдаемом поле фактически без всякой интерпретации с использованием создаваемых достоверных и детальных двумерных и трехмерных «образов», а также и выявлять в экспериментальных исследованиях ранее неизвестные эффекты.

ЛИТЕРАТУРА

- Заборовский А.И.** Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963, 423 с.
Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Новосибирск, НГУ, 2002, 208 с.
Уэйт Дж.Р. Геоэлектромагнетизм. Пер. с англ. М., Недра, 1987, 235 с.
Mogilatov V. Excitation of a half-space by a radial current sheet source // Pure and Applied Geophysics, 1996, v. 147, № 4, p. 763—775.
Wait J.R. Letter to editor. Comment on «Excitation of a half-space by a radial current sheet source» by V. Mogilatov // Pure and Applied Geophysics, 1997, v. 150, № 1, p. 155.

*Рекомендована к печати 11 октября 2013 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
15 июля 2013 г.*