

КВАДРУПОЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Б.М. Чистосердов

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

Показано, что с помощью квадрупольной индукционной установки можно осуществить вертикальную фокусировку нормального магнитного поля. Частотная зависимость кажущегося сопротивления, рассчитанная по реальной части измеряемого магнитного поля, позволяет эффективно выделять anomalously проводящие объекты даже в случаях, когда исследуемый объект перекрыт достаточно мощным слоем с повышенной электропроводностью.

Квадрупольная установка, фокусировка поля, частотное зондирование.

A QUADRUPOLE SYSTEM FOR INDUCTION SOUNDINGS

B.M. Chistoserdov

It is shown that vertical focusing of the normal magnetic field can be performed using a quadrupole induction system. The frequency dependence of apparent resistivity calculated from the real part of the measured magnetic field allows effective detection of anomalously conducting objects, even in the cases where the investigated object is overlapped by a thick layer with high electrical conductivity.

Quadrupole system, field focusing, frequency sounding

ВВЕДЕНИЕ

При проведении индукционных электроразведочных работ нередко возникают ситуации, когда чувствительности традиционных методов оказывается недостаточно. Для повышения чувствительности измерений разработана установка [Патент..., 2000, 2004; Человечков и др., 2008], при использовании которой можно фокусировать первичное магнитное поле на заданной глубине. Это позволяет уменьшить вклад верхних слоев разреза в измеряемый сигнал, в результате чего относительно возрастает доля сигнала, генерируемая исследуемым объектом. К повышению информативности приводит также интерпретация с помощью частотной зависимости кажущегося сопротивления, рассчитанного на основе реальной части вторичного магнитного поля. Применение установки, описанной в работах [Патент..., 2000, 2004; Человечков и др., 2008], дает возможность решать задачу выявления глубокозалегающих проводящих объектов. Однако, если изучаемый объект перекрыт достаточно мощным слоем с повышенной электропроводностью, обнаружить его довольно сложно.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе рассматривается установка (рис. 1), позволяющая с помощью частотного зондирования обнаруживать проводящие слои в разрезе, где исследуемый горизонт перекрыт низкоомным слоем.

Предлагаемая установка [Патент..., 2007] состоит из двух магнитных квадруполей, расположенных симметрично относительно общего центра в точке O , где находится датчик измерительного прибора. Термин «квадруполь» в этом случае является условным, так как рассматриваемый в электродинамике магнитный квадруполь точечный. В данной установке магнитные моменты (M_1 , M_2) располагаются на одной линии симметрично относительно центра установки на расстояниях d_1 и d_2 (см. рис. 1). В дальнейшем эта установка будет именоваться как квадрупольная установка (КУ). Очевидно, что КУ может использоваться в дифференциальном режиме при измерении вертикальной компоненты магнитного поля (в этом случае один из квадруполей может быть отключен), однако этот режим рассматриваться не будет.

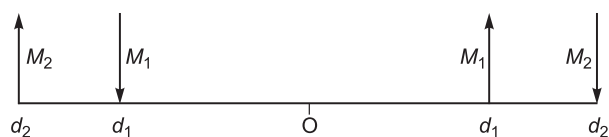


Рис. 1. Схема квадрупольной установки.

Описание см. в тексте.

Каждый из четырех вертикальных магнитных моментов, входящих в КУ, создает в точке измерения радиальную компоненту магнитной индукции $B_{\rho\alpha}$ в соответствии с формулой [Светов, 1973]

$$B_{\rho\alpha} = \mu M_{\alpha} 3\rho_{\alpha}(z - h_{0\alpha})/4\pi r_{\alpha}^5 + \mu M_{\alpha}/4\pi r_{\alpha}^3 \int_0^{\infty} u^2 J_1(u) a_{\alpha} e^{u(z+h_{0\alpha})/\rho_{\alpha}} du, \quad (1)$$

где $a_{\alpha} = -1 + 2u/(u + u_{1,\alpha}/R_{\alpha})$, $u_{1,\alpha} = (u - i\omega\mu\sigma_1\rho_{\alpha}^2)^{0.5}$,

$$R_{\alpha} = \text{cth} \left[u_{1,\alpha} h_1/\rho_{\alpha} + \text{arcth} \left((1 + n_{12,\alpha})/(1 - n_{12,\alpha}) \right) \text{cth} u_{2,\alpha} h_2 + \dots \text{arcth} \left((1 + n_{(N-1)N,\alpha})/(1 - n_{(N-1)N,\alpha}) \right) \right],$$

$$n_{(N-1)N,\alpha} = (u_{N-1,\alpha} - u_{N,\alpha})/(u_{N-1,\alpha} + u_{N,\alpha}), \quad u_{N,\alpha} = (u - i\omega\mu\sigma_N\rho_{\alpha}^2)^{0.5}, \quad r_{\alpha} = \left((z - h_{0\alpha})^2 + \rho_{\alpha}^2 \right)^{0.5}.$$

Здесь α — номер источника, первый член в формуле (1) есть первичное магнитное поле, созданное источником с номером α , z и $h_{0\alpha}$ — вертикальные координаты точки измерения и источника, σ_1 — электропроводность верхнего слоя, h_1, h_2 — мощности первого и второго слоев, N обозначает порядковый номер слоя в разрезе. Соотношения (1) записаны в системе координат, где ось z направлена в глубь Земли.

Как видно из формулы (1), при $z \neq h_{0\alpha}$ каждый источник создает в точке измерения первичное радиальное магнитное поле, которое не содержит информации об исследуемом объекте. Суммарное первичное поле установки (см. рис. 1) $B_{\rho 0} = \sum_{\alpha} \mu M_{\alpha} 3\rho_{\alpha}(z - h_{0\alpha})/4\pi r_{\alpha}^5$. Наличие этого поля в точке измерений неизбежно приводит к снижению чувствительности установки. Для устранения этого недостатка целесообразно изменить положение точки измерений таким образом, чтобы первичные магнитные поля, создаваемые отдельными источниками, компенсировали друг друга в точке измерения. Действительно, вводя обозначение $\varepsilon_{\alpha} = (z - h_{0\alpha})/\rho_{\alpha}$ и полагая $\varepsilon_{\alpha} \ll 1$, получаем $r_{\alpha} \sim \rho_{\alpha}$. В результате условие равенства нулю величины $B_{\rho 0}$ может быть записано как $(M_1/d_1^3)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = (M_2/d_2^3)(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)$, где d_1 и d_2 являются разносами установки (см. рис. 1). Ниже будет показано, что наибольшая чувствительность установки достигается при $M_1/d_1 = M_2/d_2$. В этом случае равенство нулю $B_{\rho 0}$ достигается при значении z , равном

$$z = 0.5(h_{01} + h_{02} - (h_{03} + h_{04})d_1^3/d_2^3)/(1 - d_1^3/d_2^3). \quad (2)$$

После компенсации первичного поля измеряемая радиальная компонента магнитного поля вычисляется по формуле

$$B_{\rho} = \mu M_1/4\pi d_1^3 \int_0^{\infty} u^2 J_1(u) a_1 \left(e^{u(z+h_{01})/d_1} + e^{u(z+h_{02})/d_2} \right) du - \mu M_2/4\pi d_2^3 \int_0^{\infty} u^2 J_1(u) a_2 \left(e^{u(z+h_{03})/d_2} + e^{u(z+h_{04})/d_2} \right) du, \quad (3)$$

где z следует рассчитывать по формуле (2).

При определении величин кажущихся сопротивлений по результатам измерений, полученных с помощью квадрупольной установки, приходится сталкиваться на высоких частотах с появлением немонотонной зависимости величины радиальной компоненты магнитной индукции от электропроводности однородного проводящего полупространства. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость реальной части магнитной индукции $B_{qr}(\sigma)$. В этом случае, как и при использовании двухпетлевой установки [Человечков и др., 2008], рекомендуется при-

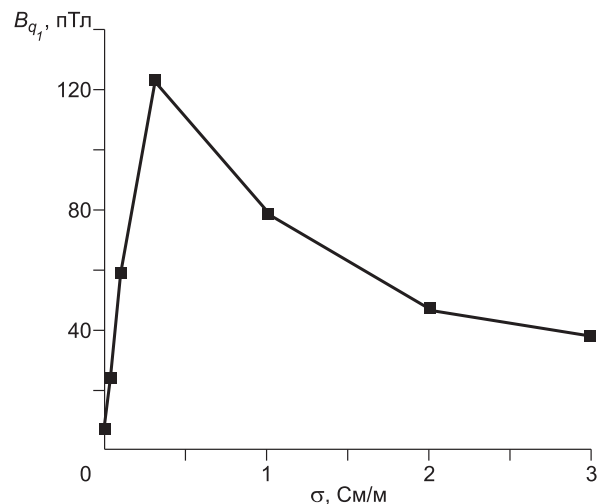


Рис. 2. Зависимость магнитного поля, измеряемого квадрупольной установкой, от удельной электропроводности полупространства.

$M_1 = 1000 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, $f = 1000 \text{ Гц}$, $d_1 = 100 \text{ м}$, $M_2 = 1.2M_1$, $d_2 = 1.2d_1$, $z = 0.1 \text{ м}$.

менять левую (восходящую) ветвь зависимости $B_{gr}(\sigma)$. При больших параметрах поля ($\omega\mu\sigma d_1^2 > 1$) измеренное значение реальной части магнитной индукции B_{gr} может оказаться больше максимума зависимости $B_{gr}(\sigma)$. В такой ситуации рекомендуется повторить измерения при меньшем значении d_1 .

Появление немонотонной зависимости, приведенной на рис. 2, можно качественно объяснить следующим образом. При малых значениях электропроводности максимумы магнитных полей, создаваемые в проводящем полупространстве квадрупольями с параметрами M_1, d_1 и M_2, d_2 , разнесены по вертикали. Вследствие уменьшения величины скин-слоя (при увеличении σ) расстояние между максимумами уменьшается, в результате чего в полупространстве происходит взаимная компенсация полей, создаваемых квадрупольями, что и приводит к уменьшению измеряемого на поверхности Земли магнитного поля.

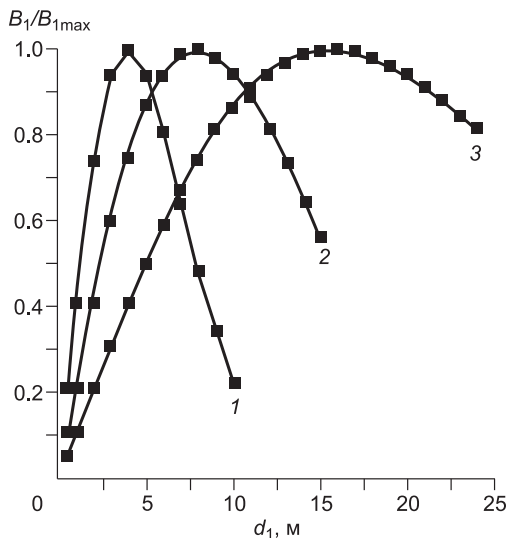
Основным достоинством КУ является возможность компенсировать в точке измерения часть сигнала, возбуждаемого верхним слоем разреза. Рассмотрим простую ситуацию, когда вертикальные координаты всех источников и точки измерения совпадают. Наиболее наглядно процедуру компенсации можно проиллюстрировать на низких частотах. Рассмотрим низкочастотное приближение для радиальной компоненты магнитной индукции, измеряемой в центре установки. Тогда для трехслойного разреза при $z = h_0$ можно написать [Светов, 1973]

$$B_\rho = i\omega\mu \frac{\mu}{8\pi} \left\{ \frac{M_1}{d_1} \left[\sigma_1 \left(1 - \frac{2h_0}{\sqrt{(2h_0)^2 + d_1^2}} \right) + (\sigma_2 - \sigma_1) \left(1 - \frac{2h_1}{\sqrt{(2h_1)^2 + d_1^2}} \right) + (\sigma_3 - \sigma_2) \left(1 - \frac{2h_2}{\sqrt{(2h_2)^2 + d_1^2}} \right) \right] - \frac{M_2}{d_2} \left[\sigma_1 \left(1 - \frac{2h_0}{\sqrt{(2h_0)^2 + d_2^2}} \right) + (\sigma_2 - \sigma_1) \left(1 - \frac{2h_1}{\sqrt{(2h_1)^2 + d_2^2}} \right) + (\sigma_3 - \sigma_2) \left(1 - \frac{2h_2}{\sqrt{(2h_2)^2 + d_2^2}} \right) \right] \right\}, \quad h_{12} = h_1 + h_2. \quad (4)$$

Здесь h_0 — вертикальная координата источника.

Как видно, величина B_ρ определяется суммарным влиянием верхнего слоя и скачками электропроводности на границах нижележащих слоев. Если параметры квадрупольей удовлетворяют соотношению $M_1/d_1 = M_2/d_2$, то выражение для радиальной компоненты магнитной индукции поля принимает вид

$$B_\rho = -\frac{i\omega\mu^2 M_1}{8\pi d_1} \left\{ \sigma_1 \left(\frac{2h_0}{((2h_0)^2 + d_1^2)^{0.5}} - \frac{2h_0}{((2h_0)^2 + d_2^2)^{0.5}} \right) + (\sigma_2 - \sigma_1) \left(\frac{2h_1}{((2h_1)^2 + d_1^2)^{0.5}} - \frac{2h_1}{((2h_1)^2 + d_2^2)^{0.5}} \right) + (\sigma_3 - \sigma_2) \left(\frac{2h_{12}}{((2h_{12})^2 + d_1^2)^{0.5}} - \frac{2h_{12}}{((2h_{12})^2 + d_2^2)^{0.5}} \right) \right\}. \quad (5)$$



На практике отношение $2h_0/d_1 < 0.01$, в результате чего влияние верхнего слоя разреза на результаты измерений оказывается ослабленным более чем в 100 раз. Если необходимо уменьшить влияние второго слагаемого в выражении (5) на измеряемую величину B_ρ , то для этого достаточно увеличить d_1 настолько, чтобы выполнялось соотно-

Рис. 3. Зависимость глубины фокусировки нормального магнитного поля, создаваемого КУ в проводящем полупространстве при различных значениях величины d_1 .

$\sigma = 0.01$ См/м, $f = 100$ Гц, кривые: 1 — $d_1 = 10$ м, 2 — $d_2 = 20$ м, 3 — $d_3 = 40$ м.

шение $2h_1/d_1 \ll 1$. Таким образом, рассматриваемую индукционную установку (при выполнении соотношения $M_1/d_1 = M_2/d_2$) можно эффективно использовать в ситуациях, когда верхние слои разреза обладают пониженным сопротивлением. В этом случае уменьшение в измеряемом сигнале вторичного магнитного поля, генерируемого в верхних слоях разреза, приводит к относительному увеличению доли сигнала, генерируемого изучаемым объектом, т.е. чувствительность КУ оказывается выше по сравнению с установками, в которых отсутствует ослабление экранирующего влияния верхних слоев.

Сравнивая двухпетлевую [Человечков и др., 2008] и квадрупольную [Патент..., 2007] установки, заметим, что в двухпетлевой установке осуществляется фокусировка первичного поля, в то время как КУ позволяет фокусировать на заданной глубине нормальное магнитное поле (рис. 3), что приводит к более полному ослаблению влияния верхнего слоя разреза на измеряемый сигнал.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Далее рассмотрим дистанционное и частотное зондирование с использованием КУ. При изучении дистанционного зондирования ограничимся трехслойными разрезами, содержащими слой с пониженным сопротивлением под слоем наносов.

Особенность дистанционного зондирования в данном случае состоит в том, что для больших разностей не всегда удастся найти соответствующее значение кажущегося сопротивления. Поэтому для получения информации о разрезе приходится ограничиваться дистанционной зависимостью величины измеряемого поля. При проведении дистанционного зондирования целесообразно использовать низкие частоты, так как только в этом случае первичное магнитное поле может без заметного затухания достигать нужных глубин.

На рис. 4 представлена кривая дистанционной зависимости мнимой части измеряемого магнитного поля для трехслойной среды. Кривая 1 посчитана для разреза, в котором сопротивление среднего слоя заменено на сопротивление верхнего слоя, т.е. в этом разрезе отсутствует аномально проводящий слой. Кривые 2 и 3 (см. рис. 4) имеют минимум при $d_1 = 10$ м, который тем глубже, чем меньше сопротивление аномального слоя. Если в изучаемом разрезе верхний слой обладает пониженным сопротивлением, то эффективность КУ в рассматриваемом случае становится недостаточной для выявления нижележащих слоев.

Более высокую чувствительность измерений обеспечивает частотное зондирование с определением кажущегося сопротивления по реальной части горизонтальной компоненты магнитного поля.

В качестве примера рассмотрим сначала разрез, в котором слой с пониженным сопротивлением перекрыт сверху наносами, имеющими более высокое сопротивление. На рис. 5 приведена частотная зависимость кажущегося сопротивления, определенного по реальной части радиальной компоненты

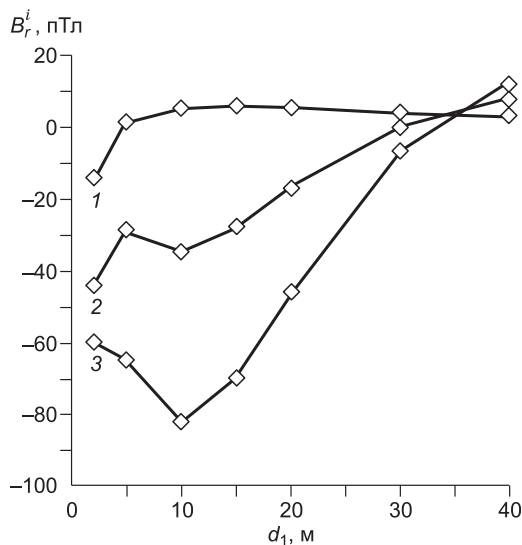


Рис. 4. Дистанционное зондирование при условии $M_1/d_1 = M_2/d_2$.

Кривые 1—3 построены для разреза: 1 — $\rho_1 = 100$ Ом·м, $h_1 = 20$ м, $\rho_2 = 500$ Ом·м; 2 — $\rho_1 = 100$ Ом·м, $h_1 = 10$ м, $\rho_2 = 20$ Ом·м, $h_2 = 10$ м, $\rho_3 = 500$ Ом·м; 3 — $\rho_1 = 100$ Ом·м, $h_1 = 10$ м, $\rho_2 = 10$ Ом·м, $h_2 = 10$ м, $\rho_3 = 500$ Ом·м. $f = 156$ Гц, $M_1 = 1000$ А·м².

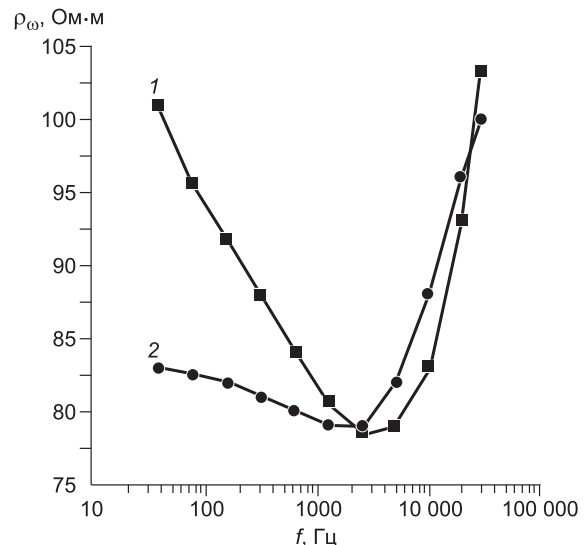


Рис. 5. Частотная зависимость кажущегося сопротивления для разреза.

$\sigma_1 = 0.01$ См/м, $h_1 = 40$ м, $\sigma_2 = 0.05$ См/м, $h_2 = 10$ м, $\sigma_3 = 0.005$ См/м (разности: 1 — $d_1 = 30$ м, $d_2 = 36$ м; 2 — $\rho = 100$ Ом·м).

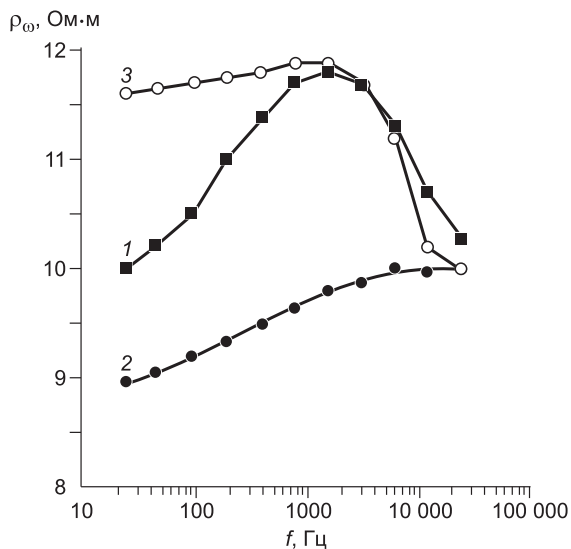


Рис. 6. Частотная зависимость кажущегося сопротивления для типичного разреза востока Курганской области [Патент..., 2007].

$\rho_1 = 10$ Ом·м, $h_1 = 40$ м, $\rho_2 = 30$ Ом·м, $h_2 = 50$ м, $\rho_3 = 8$ Ом·м. 1—3 — пояснения см. в тексте.

магнитной индукции, измеренного квадрупольной установкой (кривая 1). Эта кривая имеет глубокий минимум, однозначно свидетельствующий о наличии в разрезе слоя с пониженным сопротивлением. На кривой 2 (см. рис. 5) представлена частотная зависимость кажущегося сопротивления, рассчитанного по отношению модулей вертикальной и радиальной компонент магнитной индукции, измеренной с помощью дипольной установки. Эта кривая имеет слабо выраженный минимум, выявление последнего может оказаться затруднительным при наличии электромагнитных помех.

Наиболее наглядно достоинства квадрупольной установки проявляются при измерениях на разрезах, где изучаемый объект перекрыт сверху наносами, обладающими пониженным удельным сопротивлением.

Рассмотрим в качестве примера разрез (рис. 6), характерный для востока Курганской области [Методы..., 1972]. Особенность этого разреза состоит в том, что водоносный горизонт, который требуется выявить, является более высокоомным по сравнению со слоями, между которыми он находится.

Частотные зависимости (см. рис. 6, кривые 1, 2) кажущегося сопротивления, рассчитанные по реальной части горизонтальной компоненты магнитного поля, получены для разносов $d_1 = 30$ м и $d_2 = 36$ м. Для сравнения заметим, что 50 лет назад для обнаружения подобных водоносных горизонтов с помощью метода ВЭЗ требовались разносы 500—1000 м. Кривая 1 (см. рис. 6), имеющая заметный максимум, свидетельствующий о наличии слоя с повышенным сопротивлением, получена для разреза, содержащего слой водонасыщенного песка под слоем низкоомных наносов. Кривая 2 соответствует разрезу, где удельное сопротивление второго слоя положено равным сопротивлению верхнего слоя. Кривая 3 рассчитана для дипольной установки с разносом 100 м, причем величина кажущегося сопротивления определялась по отношению модулей вертикальной и радиальной компонент измеряемого магнитного поля. Как видно, на кривой 3 имеется небольшой максимум вблизи частоты 1000 Гц. Однако при реальных измерениях выявление этого максимума затруднительно из-за наличия электромагнитных помех.

ВЫВОД

Показано, что вертикальная фокусировка нормального магнитного поля с последующим построением частотной зависимости кажущегося сопротивления, рассчитанной по реальной части измеряемого магнитного поля, позволяет эффективно выделять аномально проводящие объекты в случаях, когда исследуемый объект перекрыт достаточно мощным слоем с повышенной электропроводностью.

ЛИТЕРАТУРА

Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии / Ред. Н.И. Плотников. М., Недра, 1972, 295 с.

Патент РФ № 2156987. G 01 V 3/08. Способ индукционного вертикального зондирования / А.И. Человечков, Б.М. Чистосердов 2000. БИ № 27, 8 с.

Патент РФ № 2230341. G 01 V 3/8. Способ индукционного вертикального зондирования / Б.М. Чистосердов, А.И. Человечков, С.В. Байдилов, 2004, БИ № 6, 8 с.

Патент РФ № 2310214. G 01 V 3/8. Способ вертикального индукционного зондирования / Б.М. Чистосердов, 2007, БИ № 31, 5 с.

Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индукционной электроразведки. М., Недра, 1973, 254 с.

Человечков А.И., Чистосердов Б.М., Байдилов С.В. Использование индукционной двухпетлевой установки при частотном зондировании аномальных объектов // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (8), с. 830—836.