

Оценка радиоволнового метода зондирования грунтового массива

© А.М. Куделя, 2014

ОАО "Сучасна геофізика", Киев, Украина

Поступила 18 марта 2013 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Проаналізовано теоретичні результати, викладені у статті С.Т. Макловича, Ю.Н. Козуліна "Про поширення енергії електромагнітного поля дипольного джерела за наявності провідного півпростору". На підставі допущення про подібність розподілу електромагнітного поля коливного вертикального і горизонтального магнітного диполя за наявності провідного напівпростору експериментально досліджено ґрунтовий масив з відомою межею поділу середовищ. Результати експериментальних досліджень ґрунтового масиву схрещеними магнітними диполями зіставлені з теоретичними розрахунками, виконано оцінку геометричного зондування радіохвильовим методом.

Ключові слова: радиоволновой метод, геометрическое зондирование, магнитный диполь, индукционный эффект.

Evaluation of radio-wave method of soil massif sounding

© А.М. Kudelya, 2014

Analysis of theoretical results given in the paper of S.T. Maklovich and Yu.N. Kozulin "On energy propagation of electromagnetic field from dipole source in presence of conducting half-space" has been proposed. On the base of an assumption of similarity of electromagnetic field distribution of oscillating vertical and horizontal magnetic dipole in presence of conducting half-space, experimental studies of soil massif with known media interface have been conducted. Results of experimental studies of soil massif by crossed magnetic dipoles have been compared with theoretical calculations and valuation of geometric sounding by radio-wave method has been done.

Key words: radio-wave method, geometric sensing, magnetic dipole, induction effect.

Введение. Радиоволновой метод (РМ) является одним из геофизических методов исследования, который основывается на изучении процесса распространения в горных породах электромагнитных волн и наблюдении индукционных эффектов в грунтовых слоях с разными величинами проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости. В статье приводится сопоставление результатов теоретических расчетов возможности радиоволнового зондирования в ближней зоне [Малкович,

Козулин, 1975] с экспериментальными результатами зондирования малых глубин радиоволновой системой, состоящей из скрещенных магнитных диполей.

Проведенные в работе [Малкович, Козулин, 1975] исследования показали возможность экспериментального измерения плотности потока энергии гармонически осциллирующим вертикальным магнитным диполем (ВМД) для получения информации о геоэлектрическом разрезе исследуемого грунтового массива.

Рассмотрим условия такой возможности для измерений в ближней зоне в предположении, что проводимость среды стремится к нулю. Покажем, что угол, образованный вектором среднего потока плотности энергии в однородном пространстве с нормалью к границе раздела сред, определяется из соотношения составляющих вектора Умова — Пойтинга вдоль осей x и z :

$$\operatorname{tg}\theta = S_r / S_z. \quad (1)$$

После подстановки в выражение (1) значений S_r и S_z получим значение

$$\operatorname{tg}\theta = 2(1 - 4a/5), \quad (2)$$

которое при $a \rightarrow 0$ стремится к своему предельному значению, где

$$S_r / S_z = 2, \text{ а } \theta = \operatorname{arctg}2 = 63^\circ 28'. \quad (3)$$

Параметр a — функция проводимости нижнего однородного полупространства, определяемая как: $a = \sqrt{\sigma\mu\omega}$ [Светлов, 1973], т. е. в случае ближней зоны, где параметр $a = \sqrt{\sigma\mu\omega} = 1$, и однородного проводящего полупространства, максимум вектора среднего потока плотности энергии гармонически осциллирующего ВМД принимает вид лучей, имеющих угол $\theta = 63^\circ 28'$ к нормали поверхности раздела сред (рис. 1). При этом направление магнитного момента диполя P совпадает с вертикальной осью z и нормалью.

Лучевое формирование плотности потока энергии гармонически осциллирующего ВМД дает основание предположить следующее. В случае наличия границы раздела грунтовых слоев, находящейся на глубине h , падающий луч плотности потока энергии отразится от этой границы и выйдет к поверхности раздела сред под углом θ .

Расположив на поверхности раздела сред приемный ВМД (R_x), можно измерять величину вторичного аномального электромагнитного поля [Якубовский, Ляхов, 1988], которое создается взаимной индукцией и сигналом, т. е. отраженным от раздела сред потоком энергии гармонически осциллирующего генераторного T_x ВМД (рис. 2). Такая схема измерений называется геометрической, а расположение ВМД — компланарным. Величина сигнала будет определяться геоэлектрическими свойствами проводящего полупространства, т. е. грунтового массива [Светов, 1973; Якубовский, Ляхов, 1988].

Наличие гармонически осциллирующего ВМД генераторного T_x и приемного R_x может

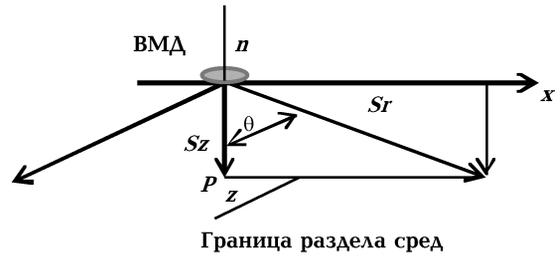


Рис. 1. Максимум вектора среднего потока плотности энергии гармонически осциллирующего ВМД.

составить систему зондирования радиоволновым методом [Якубовский, Ляхов, 1988].

Глубина зондирования границы раздела h будет определяться с учетом выражения (3) из геометрии рис. 2 в виде

$$h = L/4, \quad (4)$$

где L — расстояние между центрами магнитных диполей.

Однако при компланарном расположении на поверхности раздела сред генераторного и приемного ВМД имеет место значительная величина взаимной индукции. Это обстоятельство значительно снижает соотношение между сигналом, прошедшим через грунтовой массив, и сигналом взаимной индукции и, как следствие, имеем низкую информативность измерений. Возможен вариант иного взаимного расположения магнитных диполей.

В работе [Zhdanov, Keller, 1994] показана возможная схема измерения на основе скрещенных малых магнитных рамок (рис. 3). В этом случае величина взаимной индукции может быть уменьшена почти до нуля, следовательно информативность измерений значительно повышается. В качестве приемного использован ВМД,

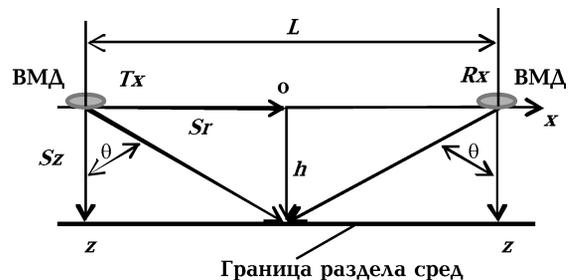


Рис. 2. Система зондирования гармонически осциллирующим генераторным T_x и приемным R_x ВМД.

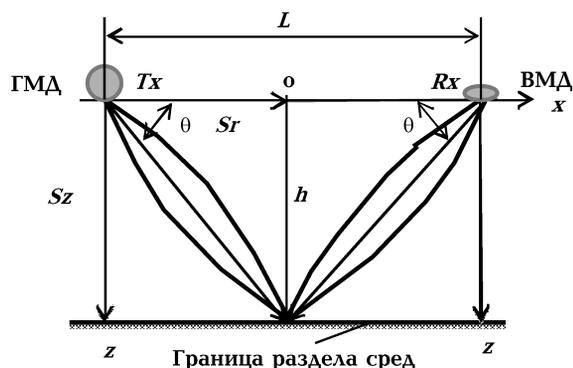


Рис. 3. Схема измерения на основе скрещенных малых магнитных рамок.

а в качестве генераторного — горизонтальный магнитный диполь (ГМД).

Магнитный момент ГМД направлен горизонтально к поверхности раздела сред. В работе [Светов, 1973] приведены сведения о наличии связей между вторичным полем вертикального и горизонтального магнитных диполей, которые выражены соотношениями электромагнитных чисел:

$$h_{xp}^1 = \cos \varphi \left[h_{zz}^1 - e_{z\varphi}^1 \right], \quad h_{x\varphi}^1 = -\sin \varphi e_{z\varphi}^1,$$

$$h^1 = -\cos \varphi h_{zp}^1, \quad (5)$$

где верхний индекс обозначает вторичное по-

ле, а нижние индексы последовательно указывают на ориентировку возбудителя и измеряемой компоненты.

Согласно работе [Светов, 1973] и эвристическим представлениям, можно предположить, что в случае гармонически осциллирующего ГМД, магнитный момент которого направлен горизонтально, определенный ранее угол θ должен отсчитываться от горизонтальной оси x . Тогда в схеме измерений (см. рис. 3) из простых геометрических соображений следует, что глубина зондирования границы раздела грунтовых слоев в проводящей среде будет равна расстоянию между центрами магнитных диполей.

Целью работы была проверка правомерности результатов теоретических расчетов и эвристического представления зондирования грунтового массива скрещенными магнитными диполями. Для этого радиоволновым методом [Якубовский, Ляхов, 1988] выполнено геометрическое зондирование грунтового массива скрещенными магнитными диполями. По полученным результатам произведена оценка РМ. Исследования проведены на известном проводящем полупространстве с известной границей раздела и глубиной ее залегания.

Исследовался грунтовый массив дамбы, в теле которой были расположены две дренажные металлические трубы диаметром 0,8 м. Трубы находились на глубине примерно 5,4 м от точки зондирования, расположенной в средней части поверхности дамбы (рис. 4, а).

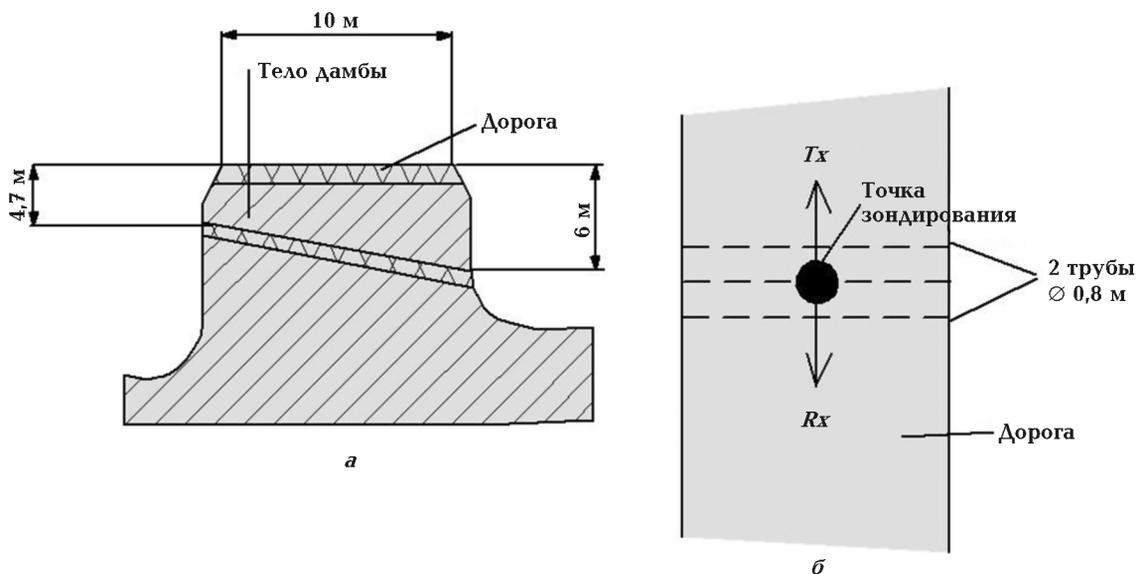


Рис. 4. Грунтовый массив дамбы, в теле которой расположены две дренажные металлические трубы диаметром 0,8 м.

Радиоволновое зондирование проводилось на частотах 1, 2 и 4 МГц. Точка зондирования располагалась над трубами в средней части дороги на дамбе (рис. 4, б). В соответствии с идеей геометрического зондирования магнитные диполи перемещались в противоположные стороны с шагом примерно 0,25 м. В каждой точке перемещения диполей производилась запись величины электромагнитного сигнала H_z компоненты в электронную память приемника. Глубина зондирования, т. е. расстояние между центрами диполей, изменялась от 1 до 10 м с шагом примерно 0,5 м.

Полевые результаты зондирования представлены в виде графиков на рис. 5, 6. Графики отображают зависимость величины электромагнитного сигнала от глубины зондирования в билогарифмических координатах: по оси ординат — амплитуда сигнала, В, по оси абсцисс — глубина зондирования, м. Аномалии вторичного электромагнитного поля наблюдаются в виде осцилляций сигнала в пределах глубины залегания труб. Для более точного определения глубины залегания труб графики были продифференцированы. В результате был определен интервал глубин залегания центра труб, который изображен стрелками для указанных частот зондирования (рис. 7):

- на частоте 1 МГц (от 4 до 7 м) среднее значение $5,5 \pm 0,5$ м;
- на частоте 2 МГц (от 4,5 до 6 м) среднее значение $5,25 \pm 0,5$ м;
- на частоте 4 МГц (от 4,5 до 6 м) среднее значение $5,25 \pm 0,5$ м.

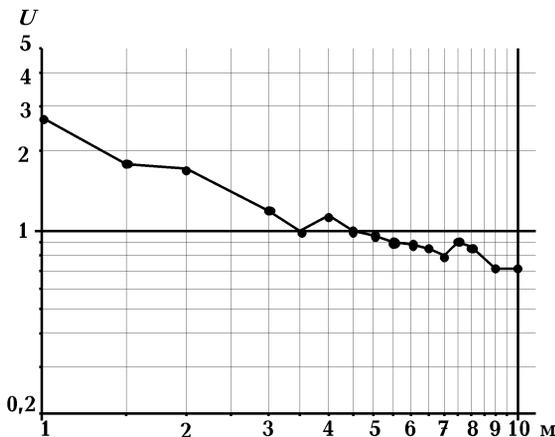


Рис. 5. График зависимости величины электромагнитного сигнала от глубины зондирования в билогарифмических координатах на частоте 1 МГц.

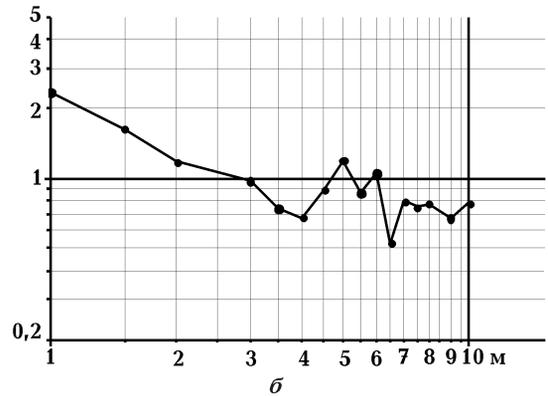
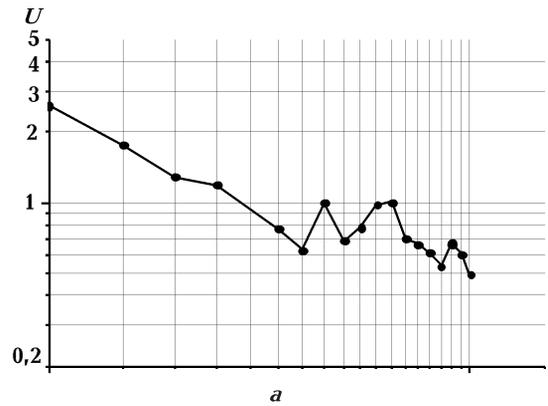


Рис. 6. График зависимости величины электромагнитного сигнала от глубины зондирования в билогарифмических координатах на частоте 2 МГц (а), 4 МГц (б).

Полученные результаты исследования позволяют оценить РМ геометрическим зондированием скрещенными магнитными диполями. Так, на частотах 2 и 4 МГц диапазон глубин залегания труб составляет 1,5 м, что значительно меньше, чем на частоте 1 МГц (3 м).

Из сопоставления графических (см. рис. 7) и цифровых результатов зондирования с геометрически рассчитанной глубиной залегания труб (см. рис. 4, а) наиболее уверенно интерпретируется и согласуется в цифровом выражении результат зондирования на частоте 2 МГц:

- радиоволновое зондирование, глубина $5,25 \pm 0,5$ м;
- геометрический расчет по данным натурного измерения, глубина 5,4 м.

Таким образом, возможен следующий вывод:

- точность измерений соответствует шагу перемещений магнитных диполей, т. е. примерно 0,5 м;
- частота 2 МГц была оптимальной из выбранных частот для заданного проводя-

щего полупространства и границы раздела сред;

— допущения о правомерности геометрического способа зондирования скрещенными магнитными диполями подтверждены результатами натурального исследования.

Для ясности понимания геометрического способа зондирования в ближней зоне проведен расчет угла θ для типовых значений кажущего удельного сопротивления грунтов ρ от 50 до 500 Ом · м.

С учетом того, что $\sigma = 1/\rho$, проведен расчет параметра $a = \sqrt{\sigma\omega}$ для указанных значений ρ и трех значений частоты: 1, 2 и 4 МГц.

Путем простых вычислений получены значения параметра a для указанных значений частоты исследования, далее из выражений (1) и (2) — угол θ , образованный вектором среднего потока энергии с нормалью раздела сред. Результаты вычислений следующие:

- 1 МГц $\theta_1 = 53,6^\circ$ при $\rho = 50$ Ом · м;
 $\theta_2 = 61^\circ$ при $\rho = 500$ Ом · м;
- 2 МГц $\theta_1 = 48,2^\circ$ при $\rho = 50$ Ом · м;
 $\theta_2 = 59,7^\circ$ при $\rho = 500$ Ом · м;
- 4 МГц $\theta_1 = 36,5^\circ$ при $\rho = 50$ Ом · м;
 $\theta_2 = 58^\circ$ при $\rho = 500$ Ом · м.

Для удобства анализа результаты вычислений отражены в виде графиков зависимости угла θ от частоты для двух значений кажущего удельного сопротивления грунтов ρ (рис. 8). Видно, что угол θ в диапазоне частот 1, 2, 4 МГц для низкоомных сред с $\rho = 50$ Ом · м изменяется от 53,6 до 36,5°, для высокоомных с $\rho = 500$ Ом · м — от 61 до 58°. Наименьшее отклонение от предельного значения 63° получено величиной 9,4° на частоте 1 МГц и 26,5° на частоте 4 МГц.

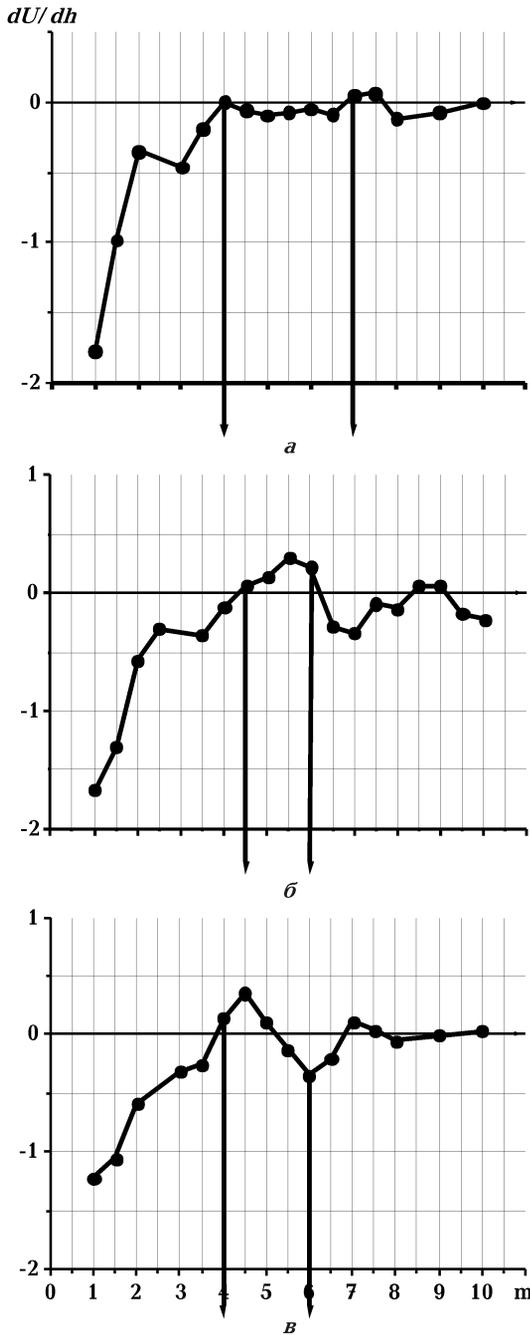


Рис. 7. График продифференцированных полевых данных измерений на частоте 1 МГц (а), 2 МГц (б), 4 МГц (в). Интервал глубин залегания центра труб изображен стрелками на оси глубин.

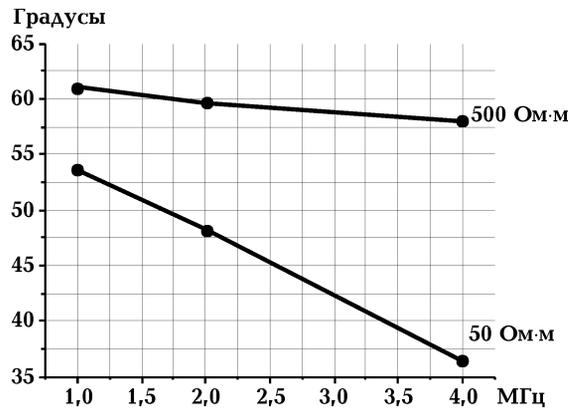


Рис. 8. График зависимости угла θ от частоты для двух значений кажущего удельного сопротивления грунтов ρ .

Сопоставление расчетных углов θ с результатами зондирования позволяет сделать следующие выводы:

- отклонение расчетного угла θ до $26,5^\circ$ на частоте 4 МГц от теоретического значения $\sim 63,5^\circ$ также позволяет определить с достаточной для практики точностью глубину залегания плоскости объекта радиоволнового зондирования;
- сочетание точности измерений и диапазон отклонений угла θ позволяют сделать допущение о том, что вектор среднего потока энергии имеет форму диаграммы направленности, зависящую от частоты и электрических свойств грунтового массива.

Выводы. Проведенные исследования проводящего полупространства радиоволновым методом скрещенными магнитными диполями в геометрическом варианте измерений показали:

- 1) допущения о правомерности зондирования скрещенными магнитными диполями

в соответствии с рассуждениями, приведенными в работе [Светов, 1973], верны;

- 2) существует оптимальная частота зондирования для проведенного исследования;
- 3) точность измерений РМ в ближней зоне зондирования связана и определяется позиционированием магнитных диполей;
- 4) вектор среднего потока энергии гармонически осциллирующего магнитного диполя [Маклович, Козулин, 1975] имеет форму диаграммы направленности, зависящую от частоты зондирования и электрических свойств грунтового массива;
- 5) значительное изменение расчетных величин угла θ в зависимости от электрических свойств грунтового массива и частоты, а также определение разрешающей способности РМ по границе раздела сред требуют дальнейших исследований на экспериментально полученной частоте зондирования.

Список литературы

Маклович С. Т., Козулин Ю. Н. О распространении энергии электромагнитного поля дипольного источника в присутствии проводящего полупространства. Изв. АН СССР. *Физика Земли*. 1975. № 11. С. 104—107 [Maklovich S. T., Kozulin Ju. N., 1975. About distribution of energy of the electromagnetic field of dipole source in presence conducting half-space. *Izvestija. AN SSSR. Fizika Zemli* (11), 104—107 (in Russian)].

Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. Москва: Недра, 1973. 253 с. [Svetov B. S., 1973. *Theory, methodology and inter-*

pretation of materials of low-frequency inductive secret electro-service. Moscow: Nedra, 253 p. (in Russian)].

Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. Москва: Недра, 1988. 5-е изд. 394 с. [Jakubovskij Ju. V., Ljahov L. L., 1988. *Secret Electro-service*. 5th Edition. Moscow: Nedra, 394 p. (in Russian)].

Zhdanov M. S., Keller G. V., 1994. *The geoelectrical methods in geophysical exploration*. Amsterdam: Elsevier, 873 p.