

УДК 550.832.75

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕИЗМЕНЕННОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА ОКОЛОСКВАЖИННЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2010 г. О.В. Юшкова, В.М. Смирнов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Россия*

Представлен метод расчета комплексной диэлектрической проницаемости осадочных пород, вскрываемых при бурении нефтяных и газовых скважин. Исходными данными служат значения разности фаз и амплитуд сигналов между парами измерительных катушек, полученные при проведении электромагнитного зондирования пород в радиальном от скважины направлении.

Ключевые слова: индукционный каротаж, обратная задача, восстановление диэлектрической проницаемости.

Введение

Одной из задач метода высокочастотного индукционного каротажа является исследование пространственного распределения удельного электрического сопротивления пород, вскрытых скважинами, с целью определения (оценки) глубины залегания контактов вода–нефть и газ–вода. Выделение неоднородностей в зоне бурения и оценка диэлектрических параметров окаймляющих скважину грунтов может служить качественным признаком присутствия подвижных углеводородов.

Способность проводить электрический ток различна у разных геологических пород. Регистрируя вдоль ствола скважины изменение параметров искусственно возбуждаемого электромагнитного поля, взаимодействующего с различными породами, можно оценить их диэлектрические свойства (диэлектрическую проницаемость, удельное электрическое сопротивление). Впервые электрические способы исследования геологических разрезов скважин, получившие название “каротажа сопротивления”, были начаты в конце двадцатых годов прошлого века. Применение методов сопротивления существенно повысило экономическую эффективность бурения скважин за счет замены кернового бурения и более четкого определения интервалов пористо-проницаемых пород-коллекторов с оценкой характера их насыщения.

Одним из наиболее универсальных видов электромагнитного зондирования является индукционный способ возбуждения и измерения переменных магнитных полей. Этот способ позволяет проводить измерения в скважинах, заполненных непроводящими электрический ток флюидами – газом или нефтью, – а также при работе с растворами на водной основе, имеющими разную соленость (электропроводность). Часть из этих условий становится препятствием к применению методов каротажа, требующих гальванического контакта с окружающей средой. Сущность индукционного метода состоит в измерении вторичного магнитного поля, созданного в измерительных катушках под действием первичного переменного поля заданной частоты. Диапазон частот в методах индукционного каротажа весьма широк – от десятков килогерц до десятков мегагерц. Исследуемая величина геологического разреза – пространственное распределение удельной электрической проводимости. Удельная электрическая проводимость (или

сопротивление) является производной от величины комплексной диэлектрической проницаемости вещества, дающей более полную информацию об исследуемых породах, и может быть использована для выделения слоев разного литологического состава, определения глубины их залегания и мощности, оценки пористости и других свойств пород, выявления полезных ископаемых.

Осадочные породы на больших глубинах представляет собой смесь минеральных частиц и флюидов, диэлектрические свойства которых достаточно хорошо изучены в лабораторных условиях. Так как действительная часть относительной диэлектрической проницаемости воды $\epsilon' \approx 81$ (при комнатной температуре), а нефти ~ 2.5 , водо- и нефтенасыщенные породы могут заметно различаться по своим электрофизическим свойствам. Известно, что осадочную породу также можно рассматривать как статистическую механическую смесь твердых частиц, газа, пленочной связанной влаги, свободной и рыхлосвязанной воды (электролита) и нефти. Для выражения комплексной диэлектрической проницаемости смеси через объемные концентрации компонент и их электрофизические характеристики рекомендуется использовать формулу Беренцвейга [Лещанский, 1980; Овчинкин, 2001].

Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных электромагнитного зондирования нефтяных скважин показал, что измерение таких параметров, как фаза и амплитуда сигнала, достаточно для численного определения диэлектрической проницаемости пород на базе моделей с цилиндрическими слоями разного диаметра, расположенных соосно скважине.

В настоящей работе рассматриваются однородные изотропные модели сред.

Исходные соотношения для решения задачи

В настоящее время основной исследуемой характеристикой разреза является удельная электрическая проводимость ρ . В реальных условиях для ее оценки в породах, вскрытых скважинами, наиболее эффективным считается метод электромагнитного (индукционного) каротажа [Антонов, 2000]. Определение удельной проводимости имеет практический смысл, когда проводится конечное число (три–пять) измерений установками разной длины. На данный момент электрическое удельное сопротивление разреза оценивается при различных априорных ограничениях на значение комплексной диэлектрической проницаемости ϵ . Так например, при обработке измерений, выполненных отечественным прибором ВИКИЗ, считается, что $\omega\epsilon\rho \ll 1$, где $\omega = 2\pi f$, f – частота зондирования [Антонов, 2000]. Поэтому целью данной работы является разработка методики расчета действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости грунта без предварительных ограничений по измеряемым значениям разности фаз $\Delta\phi$ и затухания амплитуды сигнала α в слое грунта между измерительными катушками.

Простейший индукционный зонд, с помощью которого осуществляется каротаж скважины, состоит из двух катушек – генераторной и приемной. На выходе приемной катушки измеряется разность потенциалов (ЭДС), которая зависит от тока в генераторной катушке и от токов, индуцируемых в окружающей среде. Распределение токов зависит от ионной проводимости среды и ее поляризационных диэлектрических свойств. Поэтому измеряемые значения ЭДС, связанные с этими свойствами среды, позволяют отдельно определять названные параметры. Обратная задача индукционного каротажа – задача определения параметров среды по известному электромагнитному полю на оси скважины – относится к классу некорректно поставленных задач [Тихонов, 1986]. Данные восстанавливаются при решении интегрального уравнения первого рода типа свертки при соответствующих граничных условиях.

Авторы предлагают иной подход к решению задачи определения диэлектрической проницаемости по данным состоящего из пяти зондов прибора ВИКИЗ, с помощью которого измеряются глубинные зависимости удельного электрического сопротивления грунта и разности фаз магнитного поля (или ЭДС) в разнесенных измерительных катушках. Структура прибора ВИКИЗ и принцип его работы достаточно полно описаны в методическом руководстве [Антонов, 2000].

Магнитное поле в центре измерительных катушек задается следующей формулой [Ландау, 1982]:

$$H_j = \frac{J_0 n_i S}{2\pi L_j^3} e^{-i\omega t} e^{ikL_j} (1 - ikL_j). \quad (1)$$

Так как нас интересует разность фаз, приведем формулу (1) к экспоненциальному виду, более удобному для анализа измерений амплитуды и фазы сигнала:

$$H_j = \frac{J_0 n S}{2\pi L_j^3} e^{-k'L_j + \ln\sqrt{(1+k'L_j)^2 + (kL_j)^2}} e^{i\left(-\omega t + kL_j - \arctg\frac{kL_j}{1+k'L_j}\right)} = A_j e^{iF_j}, \quad (3)$$

где $k = k' + ik''$ – волновое число; L_j – расстояние от генераторной катушки до измерительной, $j=1, 2$; J_0 – амплитуда переменного тока генераторной катушки; S – площадь витка; n – количество витков.

Определим разность фаз в двух измерительных катушках в один момент времени в однородной немагнитной среде. Согласно (3), имеем

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = k'(L_1 - L_2) - \arctg\frac{k'L_1}{1+k'L_1} + \arctg\frac{k'L_2}{1+k'L_2}. \quad (4)$$

Используя тригонометрическую формулу $\operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta}{1 + \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}$, предыдущее выражение можно представить в виде:

$$\Delta\varphi = k'(L_1 - L_2) + \arctg\frac{k'(L_2 - L_1)}{1 + k''(L_2 + L_1) + L_1 L_2 (k''^2 + k'^2)}. \quad (5)$$

Это известное уравнение, приведенное, например, в работе [Антонов, 2000], далее решается в предположении $k' = k''$, что выполняется крайне редко. Последнее равенство справедливо только при условии $\omega\varepsilon\rho \ll 1$, что следует из определения волнового числа k :

$$\begin{aligned} k &= k' + ik'' = \sqrt{i\omega\mu\sigma + \varepsilon\mu\omega^2} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\rho} 2\pi f (i + \varepsilon\omega\rho)} = \\ &= 2\pi\sqrt{f_{\text{МГц}} \frac{0.1}{\rho}} \left(\sqrt{\sqrt{1 + (\varepsilon\omega\rho)^2} + \varepsilon\omega\rho} + i\sqrt{\sqrt{1 + (\varepsilon\omega\rho)^2} - \varepsilon\omega\rho} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где учтено, что $\mu = \mu_0 \mu^* = \mu_0$ – магнитная постоянная; $\sigma = \frac{1}{\rho}$ – проводимость; $\omega = 2\pi f$; частота f задается в Гц, $f_{\text{МГц}}$ – в МГц.

Из формулы (6), в частности, следует, что, во-первых, $k' \geq k''$; во-вторых, удельное электрическое сопротивление среды определяется как $\rho = 4\pi^2 f_{\text{МГц}} \frac{0.1}{k'k''}$; в-третьих, действительная часть диэлектрической проницаемости рассчитывается по формуле

$$\varepsilon' = \frac{c^2}{4\pi^2 f^2} (k'^2 - k''^2),$$

мнимая –

$$\varepsilon'' = \frac{c^2}{2\pi^2 f^2} k' k''.$$

После арифметических преобразований уравнение (5) может быть записано в виде:

$$L_1 L_2 k''^2 + k''(L_1 + L_2) + [1 + L_1 L_2 k'^2 - k'(L_2 - L_1) \operatorname{ctg}(\Delta\varphi + k'(L_2 - L_1))] = 0. \quad (7)$$

Это квадратное уравнение относительно k'' над полем действительных чисел имеет решение, если его дискриминант $D(k') \geq 0$, т.е.

$$D(k') = (L_2 - L_1)^2 - 4L_1 L_2 [L_1 L_2 k'^2 - k'(L_2 - L_1) \operatorname{ctg}(\Delta\varphi + k'(L_2 - L_1))] \geq 0. \quad (8)$$

График функции $D(k')$ представлен на рис. 1. Для любого значения $\Delta\varphi$ существуют два интервала, на котором $D(k') \geq 0$, – интервалы 1, 2. На каждом из этих интервалов определено по два корня уравнения $k_i''(k')$ $i=1, 2$:

$$k_1'' = \frac{-(L_1 + L_2) - \sqrt{D}}{2L_1 L_2} \quad \text{и} \quad k_2'' = \frac{-(L_1 + L_2) + \sqrt{D}}{2L_1 L_2}.$$

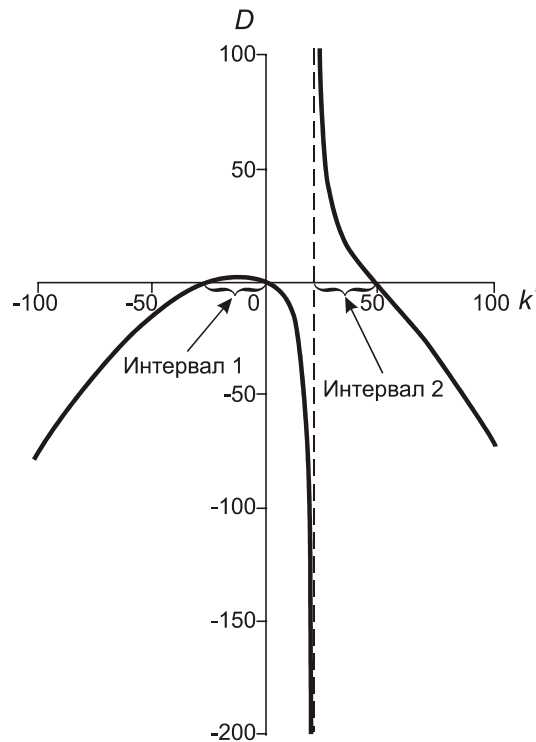


Рис. 1. Характерный вид функции $D(k')$. Сплошная линия – графики $D(k')$; штриховая – асимптота графика

Графики $k_1''(k')$ и $k_2''(k')$ для интервалов, на которых выполняется условие $D(k') \geq 0$, построенные для значений $\Delta\varphi=3^\circ$ и $\Delta\varphi=6^\circ$, приведены на рис. 2 (a – интервал 1; b – интервал 2).

Наибольший интерес представляет область, в которой и k' , и k'' положительны, т.е. корни уравнения, расположенные в первом координатном углу плоскости (K', K'') и соответствующие интервалу 2 ($D(k') \geq 0$). Функциональная зависимость $k''(k')$ при различных значениях $\Delta\varphi$ приведена на рис. 3.

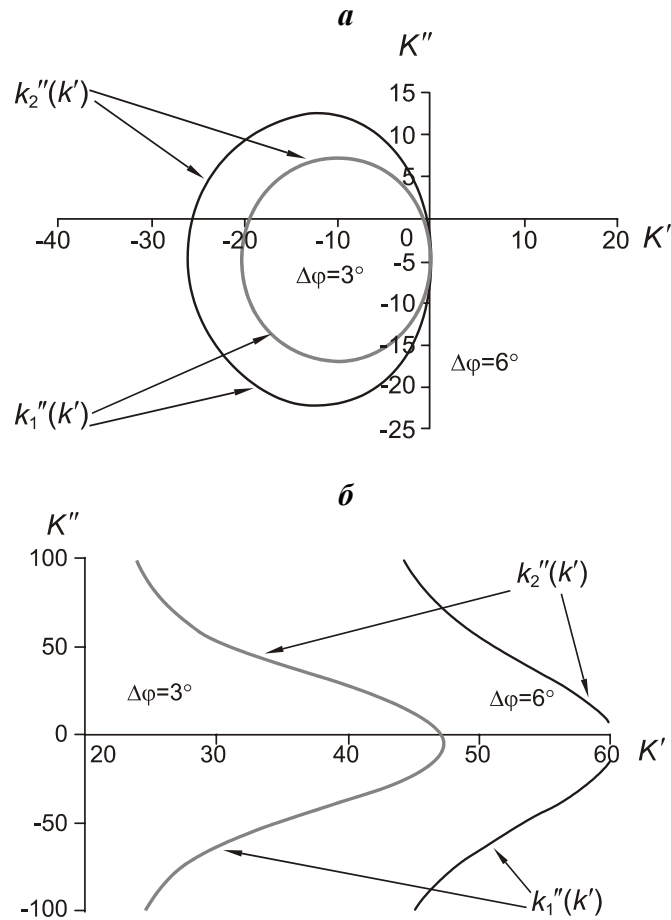


Рис. 2. Вид функций $k_1''(k')$ и $k_2''(k')$ для интервалов, на которых выполняется условие $D(k') \geq 0$: a – интервал 1; $б$ – интервал 2 (см. рис. 1)

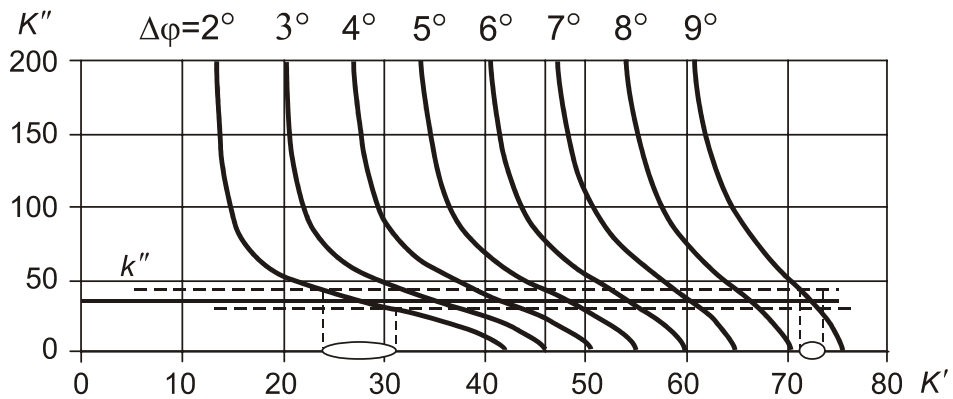


Рис. 3. Вид функции $k''(k')$ в зависимости от значения фазы $\Delta\varphi$ и графическая иллюстрация существования решения, его единственности и корректности определения значений k' и k'' (овалом обозначены интервал определения k' для одинаковой точности при разных значениях $\Delta\varphi$)

Для определения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости воспользуемся значением коэффициента затухания сигнала при его распространении между генераторной и приемной катушками. Согласно [Финкельштейн, 1977], коэффициент затухания сигнала при его распространении в среде определяется соотношением

$$\alpha = 20 \lg \exp[k''(L_1 - L_2)], \quad (9)$$

из которого следует, что $k'' = \frac{\alpha}{20(L_1 - L_2) \lg e}$. На плоскости (K', K'') это соотношение задает прямую k'' , пересекающую кривую $k''(k')$ в единственной точке (см. рис. 3), которая находится численно.

Рассмотрим крайние графики на рис. 3, построенные для одного и того же зонда (L_1, L_2, f одинаковы) при разных значениях $\Delta\varphi = 2^\circ$ (случай 1) и $\Delta\varphi = 9^\circ$ (случай 2). Для одной и той же заданной точности определения решения в случае 2 окрестность точки пересечения будет меньше, чем в случае 1, т.е. малые изменения исходных данных в случае 1 приводят к существенным отличиям от искомым значений. Таким образом, рис. 3 служит графической иллюстрацией некорректности данной задачи, наступающей при определенном соотношении измеряемых параметров. Следует отметить, что чем меньше эта окрестность, тем точнее решается задача. После нахождения значений k' и k'' комплексная диэлектрическая проницаемость исследуемого слоя грунта рассчитывается по приведенным выше соотношениям.

Таким образом, для того, что бы найти диэлектрическую проницаемость среды ε при известных значениях α и $\Delta\varphi$, необходимо решить систему

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varphi = k'(L_1 - L_2) + \arctg \left(\frac{k'(L_2 - L_1)}{1 + k''(L_2 + L_1) + L_1 L_2 (k'^2 + k''^2)} \right), \\ k' = 2\pi \sqrt{f_{\text{МГц}} \frac{0.1}{\rho} \left(\sqrt{1 + (\varepsilon\omega\rho)^2} + \varepsilon\omega\rho \right)}, \\ k'' = 2\pi \sqrt{f_{\text{МГц}} \frac{0.1}{\rho} \left(\sqrt{1 + (\varepsilon\omega\rho)^2} - \varepsilon\omega\rho \right)}, \\ \varepsilon' = \frac{c^2}{2\pi^2 f^2} (k'^2 - k''^2), \\ \varepsilon'' = \frac{c^2}{2\pi^2 f^2} k' k''. \end{array} \right. \quad (10)$$

Система (10) не имеет аналитического решения, но в области допустимых значений существует единственное решение, которое может быть найдено методом итерационных приближений.

Результаты расчета диэлектрической проницаемости грунта по данным электромагнитного каротажа

Апробация метода была проведена при обработке данных, полученных с использованием прибора ВИКИЗ при оценке параметров скважины 2021Н (Ван-Еган). Данные были предоставлены авторам Генеральным директором ООО “Помор-Герс” В.И. Дузиным в рамках инновационных разработок оптимизации геологических изысканий.

Прибор ВИКИЗ состоит из зондового устройства, электронного блока и наземной панели. Диаметр зондового устройства – 0.073 м, его длина – 4.0 м. Используется набор из пяти трехкатушечных зондов (зонды 1–5), размещенных соосно на едином стержне. Геометрические размеры зондов и их рабочие частоты приведены в таблице; схема размещения катушек – на рис. 4 (подробно прибор описан в работе [Антонов, 2000]).

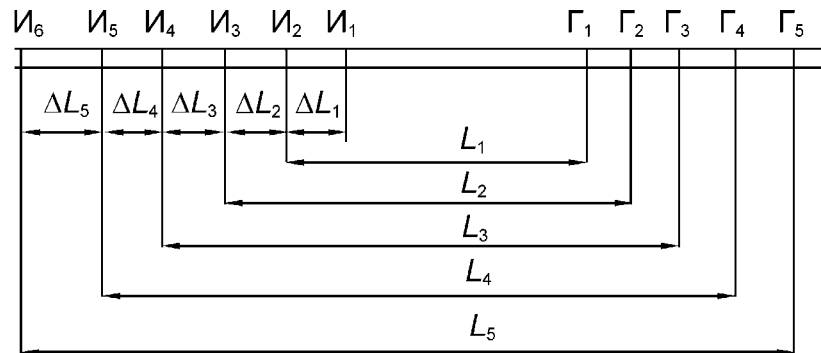


Рис. 4. Схема размещения катушек на оси прибора ВИКИЗ: И₁ – И₆ – измерительные катушки, Г₁–Г₅ – генераторные катушки, L₁ – L₅ – расстояние между второй измерительной и генераторной катушкой каждого из пяти зондов, ΔL₁ – ΔL₅ – расстояние между измерительными катушками зонда

Геометрические размеры и рабочие частоты зондов прибора ВИКИЗ [Антонов, 2000]

Номер зонда	L ₂ , м	ΔL, м	Частота, МГц
5	2.000	0.400	0.875
4	1.414	0.283	1.75
3	1.000	0.200	3.5
2	0.707	0.141	7.0
1	0.500	0.100	14.0

Все генераторные и измерительные катушки зондов меньшей длины размещены между катушками двухметрового зонда. Поочередная работа зондов обеспечивается входящим в состав прибора электронным блоком. Первой включается генераторная катушка Г₁, и измеряется разность фаз между ЭДС, наведенными в измерительных катушках И₁ и И₂. Второй включается катушка Г₂, и измеряется разность фаз между ЭДС, наведенными в измерительных катушках И₂ и И₃. Далее поочередно включаются генераторные катушки остальных зондов.

По измеренным значениям сдвига фазы и удельному сопротивлению для части пласта, не затронутой бурением, но, возможно, измененной при проникновении буровой жидкости, рассчитывалась зависимость диэлектрической проницаемости ε от глубины z. Графики ε(z) в интервале глубин 1100–1600 м для каждого из пяти зондов представлены на рис. 5 в сжатом масштабе.

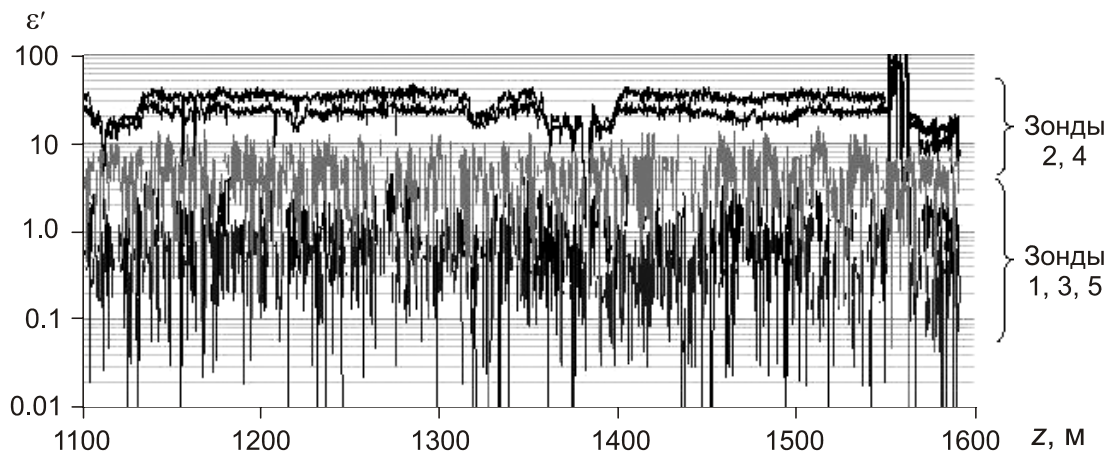


Рис. 5. Зависимость от глубины z действительной части диэлектрической проницаемости для пяти зондов ВИКИЗ на глубинах от 1100 м до 1600 м

На рис. 6 приведен график этой зависимости для слоя толщиной 200 м (от 1250 м до 1450 м), построенный по тем же данным в стандартном для геологоразведки масштабе.

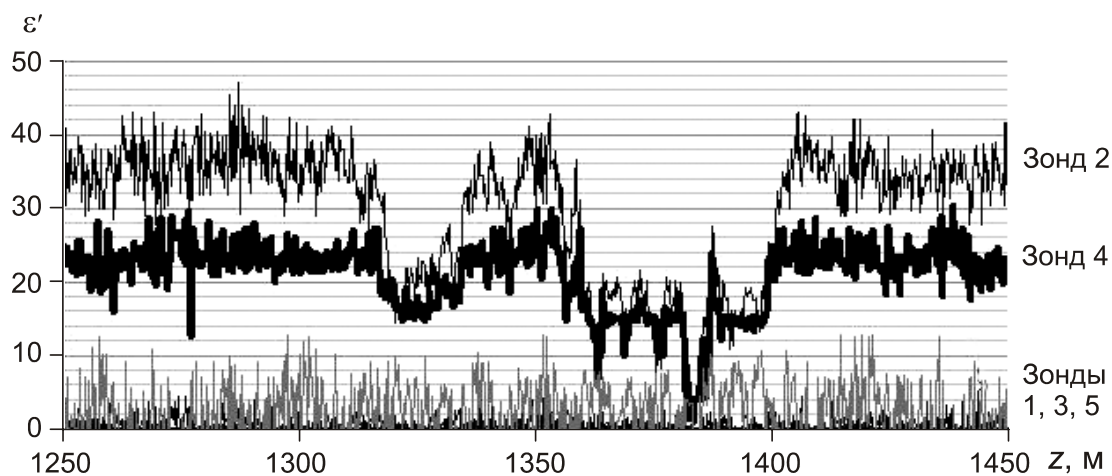


Рис. 6. Зависимость от глубины z действительной части диэлектрической проницаемости для пяти зондов ВИКИЗ в стандартном масштабе. Слой толщиной 200 м в интервале глубин 1250–1450 м

Результаты расчетов показали, что в среднем действительная часть диэлектрической проницаемости пород оценивается как 36–37 (в работе [Антонов, 2000] – 40). Графики отражают слоистую структуру разреза.

Следует заметить, что из пяти зондов устойчивыми являются измерения зондов 2 и 4; зонды 1, 2, 5 систематически занижают значение удельного электрического сопротивления. Этот факт установлен при численном моделировании процесса прохождения сигнала на частотах 14, 3.5 и 0.875 МГц в среде с диэлектрической проницаемостью, значения которой пересчитывались по данным зондов 2, 4.

Заключение

На основе решения обратной задачи электромагнитного каротажа нефтяных скважин разработан метод расчета комплексной диэлектрической проницаемости околоскважинного грунта по измеряемым значениям разности фаз и ослабления сигнала в слое между измерительными катушками.

Предлагаемый метод позволяет оценить диэлектрическую проницаемость грунта, вскрытого скважиной, по измеряемым значениям разности фаз магнитного поля и затухания амплитуды сигнала. Кроме того, изложенный подход может быть использован для тестирования работы прибора.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН “Радиолокационные методы в исследованиях природной среды и человека”.

Литература

- Антонов Ю.Н. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ / Под. ред. М.И. Эпова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 122 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- Лещанский Ю.И., Ульянычев Н.В. Расчет электрических параметров песчано-глинистых грунтов на метровых – сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 5. С.529–532.

Овчинкин О.А., Сугак В.Г. Влияние электрических свойств грунта на характеристики сигнала при подповерхностном зондировании // Радиопизика и электроника. 2001. Т. 6, № 2. С.235–241.

Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.

Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев И.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Сов. радио, 1977. 174 с.

Сведения об авторах

ЮШКОВА Ольга Вячеславовна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1. Тел.: (496)565-24-62. E-mail: o.v.y@mail.ru

СМИРНОВ Владимир Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией. Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино, пл. Введенского, д. 1. Тел.: (496)565-26-72. E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

ON DETERMINATION OF DIELECTRIC PARAMETERS OF UNDISTURBED PART OF ROCKS NEARBY BOREHOLE BY ELECTROMAGNETIC SOUNDING

O.V. Yushkova, V.M. Smirnov

Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino, Russia

Abstract. A method to estimate complex dielectric permeability of sedimentary layers opened uncovered by borehole cavity is presented. The phase and amplitude differences of the signals registered received by two receiving coil when at carrying out electromagnetic of jogging sounding of sedimentary rock in a radial direction from a borehole cavity between two receiving coil served as the initial data for this task problem solution.

Keywords: induction logging sounding, inverse problem, determination of dielectric permittivity.