



Рис. 4. Расчетные графики аномального поля над наклонной полуплоскостью при углах наклона 90° и 60°

α — угол наклона полуплоскости S к поверхности земля — воздух; $\bar{H} = H/r$, H — кратчайшие расстояния от точки наблюдения до пласта; M_z — момент вертикального магнитного диполя.

В табл. 2 приведены числовые значения вертикальной компоненты скорости магнитной индукции вертикального магнитного диполя $[\dot{B}_z^z(t)T/c]$, рассчитанные по формуле (11). На графиках изменения этого поля по профилю, пересекающему полуплоскость S , наклоненную к земной поверхности под углами 60° и 90° (рис. 4), видна асимметрия графика при наклоне пласта на угол 60° , причем по падению пласта интенсивность поля существенно больше, чем со стороны восстания. Для сравнения формы аномалии на этом же рисунке показан график вертикальной компоненты магнитной индукции при наблюдении поля с одной стороны вертикальной полуплоскости S , который подобен соответствующей стороне графика на рис. 2, но сконструированной суперпозицией полей взаимно перпендикулярных магнитных диполей [5]. Форма и интенсивность рассматриваемых аномальных полей не противоречат классическим положениям теории электромагнитного профилирования.

Таким образом, сопоставление расчетных данных по сформированным математическим моделям неустановившегося электромагнитного поля вертикальной полуплоскости S (вертикального геологического контакта) с данными теоретической базы МПП, основанной в основном на результатах физического моделирования, а также с теоретическими расчетами технологических схем индуктивного электромагнитного профилирования подобных моделей, показывают их практическую идентичность с учетом поправок на индивидуальную особенность сравниваемых моделей.

Результаты исследований могут быть использованы для прогнозирования неустановившегося электромагнитного поля крутопадающих электропроводных рудных тел, тектонических нарушений, контактов различных горных пород и тому подобных геологических структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бинс К., Лафренсен П. Анализ и расчет электрических полей. — М.: Энергия, 1970.
2. Великин А.Б., Франтов Г.С. Электромагнитные поля, применяемые в индукционных методах электроразведки: Обзор зарубежной литературы. — Л.: Гостоптехиздат, 1962.
3. Дмитриев В.И., Барышникова И.А., Захаров Е.В. Аномальные электромагнитные поля пластовых тел. — Л.: Недра, 1977.
4. Захаров В.Х. Электроразведка методом дипольного индуктивного профилирования. — Л.: Недра, 1975.
5. Исаев Г.А., Ним Ю.А., Рабинович Б.И. Тонкий низкоомный пологозалегающий пласт в поле вертикального магнитного диполя // Тр. СНИИГиМС. — 1973. — Вып. 172. — С. 51–57.
6. Кауфман А.А., Андерсен Б.И. Принципы методов наземной и скважинной электроразведки. — Тверь: Триада, 2013.
7. Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд / Под ред. А.Ф. Фокина. — Л.: Недра, 1971.
8. Ним Ю.А. Основы приближенной теории электротондирования методом переходных процессов // Геология и геофизика. — 1989. — № 3. — С. 134–141.
9. Ним Ю.А. Неустановившееся электромагнитное поле горизонтального магнитного диполя на поверхности системы плоскостей S / Электроразведка методами ЗСБ и МПП при поисках нефтегазовых и глубоко залегающих рудных месторождений в Сибири. — Новосибирск: СНИИГиМС, 1989. — С. 135–139.
10. Руководство по применению метода переходных процессов в рудной геофизике / Под ред. Ф.М. Каменецкого. — Л.: Недра, 1979.
11. Смайт В.Р. Электростатика и электродинамика. — М.: Иностранная литература, 1954.
12. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1968.

© Ним Ю.А., Романова Л.П., Илларионова М.Г., 2015

Ним Юрий Александрович // Gmpirmpi@mail.ru
Романова Любовь Петровна // Lu.romanova95@mail.ru
Илларионова Мария Георгиевна // Millariono@mail.ru

УДК 550.837:551.345.537

Ним Ю.А., Андреева С.А. (Северо-Восточный федеральный университет)

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ИМПУЛЬСНОГО ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассматривается прямая задача георадиолокационного зондирования (РЛЗ) диэлектрического пласта при его возбуждении горизонтальным магнитным диполем в импульсном режиме. Приводятся расчеты, показывающие, что с достаточной для практики точностью электромагнитное поле выражено в элементарных функциях, по которым непосредственно определяются параметры диэлектрического пласта. **Ключевые слова:** георадиолокация, электромагнитное поле, диэлектрический пласт, зондирование.

Nim Yu.A., Andreeva S.A. (North-Eastern federal university)

THE ELEMENTS OF THE THEORY OF IMPULSE GROUND-PENETRATING RADAR

The main task of ground-penetrating radar (GPR) of dielectric layer at its activation by horizontal magnetic dipole in impulse mode is discussed. The electromagnetic field is expressed in elementary functions by which parameters of dielectric layer are determined with sufficient accuracy for practical purposes. **Key words:** ground-penetrating radar, electromagnetic field, dielectric layer, sounding.

С расширением сферы применения георадиолокации, в частности, при поисках и разведке россыпных месторождений криолитозоны, инженерно-геокриоло-

гических исследованиях, возникают вопросы теоретического обеспечения технологии импульсного зондирования с позиции классической электроразведки [1].

В методологии современной георадиолокации обратная задача геофизики решается в основном эмпирически: по горным выработкам определяется глубина залегания интересующего геологического пласта, либо его «справочная» диэлектрическая проницаемость, затем по известной формуле вычисляется скорость распространения электромагнитных волн в диэлектрической среде, т.е. какой-либо параметр находится априори [3, 5].

Поэтому рассмотрим прямую и обратную задачу собственно георадиолокационного зондирования (РЛЗ) при возбуждении диэлектрической среды (объекта исследования) импульсным электромагнитным полем горизонтального магнитного диполя [1, 2].

Электрический пласт аппроксимируем эквивалентной ему по электрофизическим параметрам плоскостью: $D = \lim \varepsilon l$ при $\varepsilon \rightarrow \infty$, $l \rightarrow 0$. Здесь D — продольная диэлектрическая проницаемость пласта, ε — объемная диэлектрическая проницаемость пласта, l — мощность пласта.

Горизонтальный магнитный диполь с моментом $M = M_x e^{i\omega t}$, ориентированный по оси x декартовой системы координат (x, y, z) , поместим в начало цилиндрической системы координат (r, ϕ, z) , совмещенной с декартовой, расположенной на расстоянии $h = -z$ от плоскости D . Здесь ω — круговая частота, t — время, i — мнимая единица. Согласно уравнениям электродинамики электромагнитное поле данной системы описывается уравнением Гельмгольца:

$$\nabla^2 A_{z,x} + k^2 A_{z,x} = 0, \quad (1)$$

где $A_{z,x}$ — компоненты вектор-потенциала магнитного поля; $k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu$ — волновое число; μ — магнитная проницаемость вакуума. Вне пласта электромагнитное поле описывается уравнением Лапласа ввиду малости волнового числа в воздухе:

$$\nabla^2 A_{z,x} = 0. \quad (2)$$

Стандартное решение представляется в виде [2]

$$\begin{aligned} A_{1x} &= \bar{M} \int_0^\infty B_1 e^{mz} J_0(mr) dm; \\ A_{2x} &= \bar{M} \int_0^\infty (e^{m|z|} + B_0 e^{-mz}) J_0(mr) dm; \\ A_{1z} &= \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty C_0 e^{-mz} J_0(mr) dm; \\ A_{2z} &= \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty C_1 e^{mz} J_0(mr) dm, \end{aligned} \quad (3)$$

где $J_0(mr)$ — функция Бесселя нулевого порядка; m — переменная разделения.

Для определения коэффициентов B_0, B_1, C_0, C_1 выпишем граничные и краевые условия [3]:

$$\begin{aligned} 1. \quad & \frac{\partial A_{1x}}{\partial z} = \frac{\partial A_{2x}}{\partial z}; \\ 2. \quad & A_{1z} = A_{2z}, \end{aligned}$$

$$3. \quad \frac{\partial A_{1x}}{\partial z} = \frac{\partial A_{2x}}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

$$4. \quad \frac{\partial A_{1x}}{\partial x} + \frac{\partial A_{1z}}{\partial z} - \frac{\partial A_{2x}}{\partial x} - \frac{\partial A_{2z}}{\partial z} = (i\omega)^2 \mu D A_{(1,2)z}.$$

$$5. \quad \text{При } r \rightarrow 0, A_x = \frac{i\omega \mu M_x}{4\pi} = \bar{M} \frac{1}{r}; \text{ при } r \rightarrow \infty, A_x \rightarrow 0.$$

Для соблюдения граничных условий (4) определим соответствующие производные вектор-потенциалов A_x и A_z :

$$\text{I.} \quad \begin{cases} 1. \quad \frac{\partial A_{1x}}{\partial z} = \bar{M} \int_0^\infty (me^{m|z|} - mB_0 e^{-mz}) J_0(mr) dm, \\ 2. \quad \frac{\partial A_{2x}}{\partial z} = \bar{M} \int_0^\infty mB_1 e^{mz} J_0(mr) dm. \end{cases}$$

$$\text{II.} \quad \begin{cases} 3. \quad \frac{\partial A_{1x}}{\partial x} = \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty (e^{m|z|} + B_0 e^{-mz}) J_0(mr) dm, \\ 4. \quad \frac{\partial A_{2x}}{\partial x} = \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty B_1 e^{mz} J_0(mr) dm. \end{cases}$$

$$\text{III.} \quad \begin{cases} 5. \quad \frac{\partial A_{1z}}{\partial z} = \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty (-mC_0 e^{-mz}) J_0(mr) dm, \\ 6. \quad \frac{\partial A_{2z}}{\partial z} = \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty mC_1 e^{mz} J_0(mr) dm. \end{cases}$$

На границе $z = -hz$, ввиду ортогональности функций Бесселя, подинтегральные выражения равны, поэтому

$$\begin{aligned} 1. \quad & C_0 e^{mh} = C_1 e^{-mh}, \text{ откуда } C_0 = C_1 e^{-2mh} \text{ или } C_1 = C_0 e^{2mh}; \\ 2. \quad & m e^{-mh} - mB_0 e^{mh} = mB_1 e^{-mh} = 0, \text{ откуда } B_0 e^{-2mh}, B_1 = 0; \\ 3. \quad & e^{-mh} + B_0 e^{mh} - B_1 e^{-mh} - C_0 e^{mh} - mC_1 e^{-mh} = \\ & = (i\omega)^2 \mu D C_0 e^{mh}. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений, согласно граничным и краевым условиям (4) получим:

$$C_0 = \frac{2}{2m + (i\omega)^2 \mu D} e^{-2mh}, C_1 = \frac{2}{2m + (i\omega)^2 \mu D}, B_0 = e^{-2mh}, B_1 = 0.$$

Подставляя найденные коэффициенты в уравнения (3), получим искомые функции в гармоническом режиме.

Так, вектор-потенциал на дневной поверхности представляется в виде

$$A_{1z}(\omega) = \bar{M} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{+\infty} \frac{2}{2m + (i\omega)^2 \mu D} e^{-\alpha m} J_0(mr) dm. \quad (5)$$

Применяя обратное преобразование Фурье — Лапласа к выражению (5), получим поле во временной области [2]:

$$A_{1z}(t) = \frac{\mu M_x}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi i} \frac{e^{pt}}{p} dp \int_0^{+\infty} e^{-\alpha m} \frac{2}{\mu D} \frac{1}{p^2 - a^2} J_0(mr) dm \quad (6)$$

$$A_{1z}(t) = \frac{\mu M_x}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi i} \frac{e^{pt}}{p} dp \int_0^{+\infty} e^{-\alpha m} \frac{1}{a^2} (chat - 1) J_0(mr) dm,$$

где $\alpha = 2h + z$, $a = \left(-\frac{2m}{\mu D}\right)^{\frac{1}{2}} = i \left(\frac{2m}{\mu D}\right)^{\frac{1}{2}}$, $p = i\omega$ — символика операционного исчисления; t — время.

Преобразуя подинтегральное выражение, аппроксимируя $chat$ многочленом с точностью до единиц процента, выразим [4]

$$chat = \cos(iat) = 1 - 0,5(iat)^2 = 1 - 0,5 \frac{2m}{\mu D} t^2 = 1 - \frac{m}{\mu D} t^2$$

подставляя это преобразование в уравнение (6), получим:

$$A_{1z}(t) = -\frac{M_x}{2\pi D} x t \frac{1}{(\alpha^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Скорость изменения магнитной индукции определяется по формулам

$$\dot{B}_{1z}^x = -\frac{\partial^2 A_{1z}}{\partial z^2}, \dot{B}_{1r}^x = -\frac{\partial^2 A_{1z}}{\partial r \partial z}.$$

Взяв производные, получим выражения в элементарных функциях, из которых определяются параметры пласта.

$$\dot{B}_{1z}^x(t) = \frac{3 M_x}{2 \pi D} x t \frac{r^2 - 4\alpha^2}{(\alpha^2 + r^2)^{\frac{7}{2}}} = -\frac{6 M_x}{\pi D} \frac{x t}{\alpha^5}.$$

Здесь пренебрегаем расстоянием r по сравнению с $2h + z$ из-за его малости в практике георадиолокационных зондирований, особенно в технологиях аэровариантов.

Вычисляем радиальную компоненту магнитной индукции:

$$\dot{B}_{1r}^x(t) = \frac{15 M_x}{2 \pi D} x t r \frac{\alpha}{(\alpha^2 + r^2)^{\frac{7}{2}}}.$$

После сокращения на r из-за его малости по сравнению с параметром α получим:

$$\dot{B}_{1r}^x(t) = \frac{15 M_x}{2 \pi D} \frac{x t r}{\alpha^6}.$$

Решение системы из двух уравнений с неизвестными D и h , представлено в следующем в виде:

$$\begin{cases} D = -\frac{6 M_x}{\pi \dot{B}_{1z}^x(t)} \frac{x t}{\alpha^5} \\ D = \frac{15 M_x}{2 \pi \dot{B}_{1r}^x(t)} \frac{x t r}{\alpha^6} \end{cases} \quad (7)$$

Исключая D , находим $\alpha = -\frac{5r \dot{B}_{1z}^x}{4 \dot{B}_{1r}^x}, h = -\frac{5r \dot{B}_{1z}^x}{8 \dot{B}_{1r}^x} - \frac{z}{2}$.

Подставив α , к примеру, в первое уравнение системы (7),

$$\text{находим } D = 1,96608 \frac{x t \dot{B}_{1z}^x(t)}{\pi \dot{B}_{1z}^x(t)}.$$

Таким образом, непосредственно определяются все параметры обратной задачи геоэлектрики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ним Ю.А. Георадиолокация: элементы методологии и аппроксимационной теории // Наука и образование. — 2005. — № 4. — С. 27–32.
2. Ним Ю.А. Неустановившееся электромагнитное поле горизонтального магнитного диполя на поверхности системы плоскости S / Электроразведка методами ЗСБ и МПП при поисках нефтегазовых и глубокозалегающих рудых месторождениях в Сибири. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 1989. — С. 135–139.
3. Омеляненко А.В., Федорова Л.Л. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2006.
4. Абрмовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям: Пер. с англ. — М.: Наука, 1979.
5. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. — М.: Недра, 1986.

© Ним Ю.А., Андреева С.А., 2015

Ним Юрий Александрович // gmpirmpj@mail.ru
Андреева Сусанна Анваровна // andreeva_90@mail.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 622.276

Попов В.В., Николаева М.В., Бердыев С.С., Туги Э.Р.,
Вырдылин И.И. (Северо-Восточный федеральный
университет)

ИЗМЕНЕНИЕ ЕМКОСТНЫХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ РАЗРА- БОТКЕ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ — ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕ- ДОВАНИЯ

Рассматривается изменение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора (пористости и проницаемости), вызванное изменением пластового давления. На упрощенной двухслойной модели пласта произведена оценка влияния изменения ФЕС, на результаты моделирования разработки резервуара, характерных для ядра карбонатных горных пород. Показано изменение пористости и проницаемости, где изменение эффективного напряжения достигает 3 и 12 % соответственно. **Ключевые слова:** пористость, проницаемость, карбонатные коллектора, сжимаемость, пьезопроводность, обводненность.

Popov V.V., Nikolaeva M.V., Berdyev S.S., Tugi E.R., Vyrdylin I.I.
(North-Eastern federal university)

CHANGE CAPACITY AND FILTRATION PROPERTIES OF CARBONATE RESERVOIRS IN THE DEVELOPMENT OF OIL — IMPACT ON THE SIMULATION RESULTS. EXPERIMENTAL STUDIES

*Changing of reservoir and filtration characteristics (porosity and permeability) due to reservoir pressure changing is considered. An estimation of influence of the changing on results of simulation of petroleum reservoir development is carried out of a simplified two-layer model. The changing rate of porosity and permeability reaches in the experiments 3 % and 12 % correspondingly. **Key words:** porosity, permeability, carbonate reservoirs, compressibility, factor of pressure, water factor*

Проблема разработки трудноизвлекаемых запасов карбонатных коллекторов нефти выдвигается в настоящее время на передний план, что обусловлено постепенной выработкой запасов высокопродуктивных терригенных коллекторов. По оценкам [10], примерно 50 % подтвержденных мировых запасов нефти содержится в карбонатных коллекторах, при этом динамика соотношения балансовых запасов в карбонатных и тер-