УДК 519.6, 550.832
DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-41-55

В. Н. Глинских [1–3], **М. Н. Никитенко** [1]

[1] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН*
пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

[2] *Новосибирский государственный университет*
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия

[3] *Новосибирский государственный технический университет*
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630090, Россия

GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru, NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

ТЕОРЕТИКО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ БАЗА И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ *

Статья посвящена разработке теоретической базы компьютерного моделирования данных диэлектрического каротажа с целью обоснования нового импортозамещающего оборудования для каротажа нефтяных и газовых скважин. Разработаны алгоритмы и реализованы быстрые программы компьютерного моделирования высокочастотных электромагнитных сигналов в рамках слоисто-однородных моделей сред. По результатам масштабного моделирования амплитудно-фазовых характеристик высокочастотного поля установлена их зависимость от частотного спектра электрофизических параметров. Проведенные исследования позволяют выполнить научное обоснование и оптимальное проектирование новой электромагнитной зондирующей системы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, прямая задача, геоэлектрическая модель, электрофизические параметры, частотная дисперсия, диэлектрический каротаж.

Введение

Электромагнитные методы играют важную роль в комплексе геофизических методов исследования геологической среды в поисковых, разведочных и эксплуатационных скважинах. Современной тенденцией в развитии аппаратурно-методического обеспечения электромагнитного каротажа является создание многочастотных, многоэлементных, многокомпонентных зондовых систем. На этом пути уже преодолены многие технические и методические сложности, такие как глубокая компенсация «прямого поля», коммутация пространственно-направленного условия «возбуждение – приём», оперативная обработка данных, быстрая передача сигналов, в том числе беспроводным способом, и многое другое. Модификация зондирующих установок, а зачастую создание приборов следующего поколения на новой

* Исследования выполнены в рамках проекта «Идентификация математических моделей акустики, электродинамики и теории упругости» комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

Глинских В. Н., *Никитенко М. Н.* Теоретико-алгоритмическая база и компьютерное моделирование данных диэлектрического каротажа для изучения частотного спектра электрофизических параметров геологической среды // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 4. С. 41–55.

© В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко, 2018

микропроцессорной и элементной базе есть следствие прорыва в информационно-вычислительных технологиях, в частности для каротажных исследований.

Каротаж на переменном электрическом токе в области высокий частот (20–500 МГц) называется диэлектрическим каротажем (ДК). ДК предназначен для исследования пространственного распределения диэлектрической проницаемости (ДП) горных пород. Отечественная аппаратура ДК разработана в 60–70-е годы прошлого столетия [1]. Развитие теоретической и аппаратурной базы связано с волновым [2–5] и индуктивным [6] ДК, использующими мега- и гигагерцовый диапазоны частот соответственно. Диэлектрический каротаж на предельно высоких частотах в условиях слабопроводящих сред оперирует приближениями лучевого ряда и кинематической картиной волнового поля [7–11].

В настоящее время в компаниях Halliburton и Schlumberger применяется аппаратура волнового ДК. Она успешно используется в различных геологических условиях, где традиционные комплексы геофизических исследований и подходы к интерпретации недостаточно эффективны [12–15]. Наряду с аппаратурой ДК изучение ДП горных пород проводят по данным электромагнитного каротажа в диапазоне частот от сотен килогерц до единиц мегагерц. При этом основные результаты интерпретации данных ЭМК связывают с выявлением эффекта частотной дисперсии комплексной УЭП, определением ДП для оценки характера насыщения пород-коллекторов и изучением глинистых отложений [16–26].

В связи с повсеместным вовлечением в изучение новых типов геологических залежей, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами, существенно усложняется и расширяется круг задач скважинной геоэлектрики. Это приводит к необходимости создания новых электромагнитных методов исследования геологической среды, разработки новых подходов в решении прямых и обратных задач электродинамики, а также использования новых реалистичных интерпретационных моделей. Текущее развитие теоретико-методической базы электромагнитных зондирований геологических сред связано с вовлечением математического аппарата, учитывающего как сложную геометрическую структуру объектов, так и различные эффекты взаимодействия и распространения электромагнитного поля в горных породах. Чрезвычайно актуальными в последние годы стали задачи геоэлектрики в геологических средах, имеющих высокие значения удельного электрического сопротивления, характерные для флюидонасыщенных карбонатных и высокобитуминозных терригенных коллекторов.

В последнее десятилетие наблюдается большой интерес к исследованию механизмов и установлению зависимостей электромагнитных свойств горных пород от возбуждаемого поля на основе измерений в скважинах, лабораторных исследований на образцах керна и математического моделирования [23; 27–34]. Дисперсия электрофизических параметров горных пород наблюдается и при изучении нефтегазовых скважин с применением высокочастотного электромагнитного каротажа. Здесь используется промежуточный диапазон частот (от 875 кГц до 14 МГц), где влияние на сигнал оказывает не только диффузионные, но и волновые процессы в среде [19–22]. Современное состояние и развитие ДК детально проанализировано С. М. Аксельродом [27]. Однако в связи со сложной структурой объекта на микро- и макромасштабах исследования, а именно его пространственной неоднородностью и контрастностью физических характеристик в областях моделирования, в теории электромагнетизма до настоящего времени не существует единого математически обоснованного подхода к решению этого класса задач.

Большие перспективы вовлечения в разработку глубокозалегающих юрских и палеозойских залежей обуславливают настоятельную необходимость опережающего развития геофизических технологий для этих слабо изученных объектов. В настоящей работе выполняется изучение возможностей новых методов электромагнитных зондирований с использованием математического моделирования в реалистичных постановках применительно к изучению новых типов залежей с трудноизвлекаемыми запасами.

Измеряемые сигналы и конструктивные характеристики прибора

Для восстановления частотного спектра электрофизических параметров предлагается использовать широкий диапазон частот от 20 до 500 МГц, где влияние как удельного электри-

ческого сопротивления (УЭС), так и относительной диэлектрической проницаемости (ОДП), на измеряемые электромагнитные сигналы значительно.

Датчики прибора прижаты к стенке скважины для того, чтобы увеличить чувствительность измеренных данных к параметрам пласта, особенно на высоких частотах и в проводящем буровом растворе, где сигналы быстро затухают. Генераторная и приемные катушки расположены соосно скважине; в двух приемных катушках измеряется разность фаз и затухание амплитуды э.д.с. (или магнитного поля). Длины зондов составляют от 0,1 до 0,8 м, база трехкатушечного зонда равна 0,2. Длины выбраны исходя из возможности технической реализации и с учетом минимально допустимого уровня э.д.с. в приемных катушках.

Данная конструкция допускает следующие упрощения при моделировании: источник электромагнитного поля можно считать точечным магнитным диполем, вычисление электромагнитного поля для дальнейшей трансформации в разность фаз и затухание амплитуды можно также производить в точке, характеризующей положение измерительной катушки.

Решение прямой задачи

Рассмотрим задачу о поле вертикального магнитного диполя в цилиндрически-слоистой среде (рис. 1). Диполь находится в первом слое (скважине), плотность тока в нем изменяется по закону $I(t) = I_0 e^{-i\omega t}$.

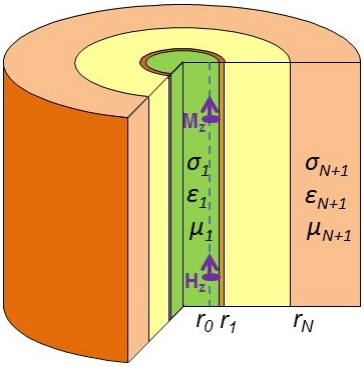

Рис. 1. Модель среды: цилиндрические слои имеют радиусы r_j, проводимости σ_j, диэлектрические проницаемости ε_j и магнитные проницаемости μ_j. Зонд M_zH_z смещен с оси скважины, совпадающей с осью z цилиндрической или декартовой системы координат

Для решения задачи используется метод разделения переменных [35; 36]. В первом слое с источником электромагнитное поле представляется в виде суммы нормального и аномального поля:

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_0, \\ \vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_0. \end{cases} \tag{1}$$

Поля $\vec{E}_1, \vec{H}_1, \vec{E}_0, \vec{H}_0$, а также поля в j-м слое $\vec{E}_j, \vec{H}_j$ подчиняются уравнениям Максвелла:

$$\begin{cases} rot\ \vec{H}_0 = \gamma_1\ \vec{E}_0, \\ rot\ \vec{E}_0 = i\omega\mu_1\ \vec{H}_0 - \vec{j}^{\mu}. \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} rot\ \vec{H}_j = \gamma_j\ \vec{E}_j, \\ rot\ \vec{E}_j = i\omega\mu_j\ \vec{H}_j. \end{cases} \tag{3}$$

Здесь $\gamma_j = \sigma_j - i\omega\varepsilon_j$ – комплексная проводимость, $\vec{j}^{\mu} = (0, 0, j_z^{\mu})$ – магнитный ток, $j_z^{\mu} = -i\omega\mu_1 \cdot M_z \cdot U(P, P_0)$, $M_z = I_0 \cdot S \cdot n_t$ – момент диполя, S – площадь генераторной катуш-

ки, n_t – число ее витков, $U(P,P_0)$ – функция источника, P_0 – координата источника, P – координата приемника, $P_0=(x_0,y_0,z_0), P=(x,y,z)$.

На границах цилиндрических слоев тангенциальные компоненты электромагнитного поля непрерывны:

$$\begin{cases} \left[E^*_{t1}\right]_{r=r_1}=-E_{t0}(r_1), \\ \left[H_{t1}\right]_{r=r_1}=-H_{t0}(r_1), \\ \left[E^*_{tj}\right]_{r=r_j}=0, \\ \left[H_{tj}\right]_{r=r_j}=0,\ j=2,N. \end{cases} \tag{4}$$

Индексом «*t*» обозначена φ- или *z*-компонента поля. Квадратные скобки в формуле (4) означают скачок функции. Уравнения. (2)–(4), а также условия убывания поля на бесконечности и конечности поля на оси скважины однозначно определяют электромагнитное поле в произвольной точке модели среды.

Будем искать аномальные поля $\vec{E}_j, \vec{H}_j$, предполагая, что нормальные поля $\vec{E}_1$, $\vec{H}_1$, $\vec{E}_0$, $\vec{H}_0$ известны. Определим прямое и обратное преобразование Фурье:

$$\begin{cases} A^*(r,\phi,\lambda)=\int\limits_{-\infty}^{\infty} A(r,\phi,z)e^{-i\lambda z}dz, \\ A(r,\phi,z)=\dfrac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} A^*(r,\phi,\lambda)e^{i\lambda z}d\lambda. \end{cases} \tag{5}$$

Из уравнений (3) получаем, что Фурье-трансформации тангенциальных компонент выражаются через Фурье-трансформации вертикальных компонент следующим образом:

$$\begin{cases} E^*_{rj}=\dfrac{1}{p_j^2}\left(-i\lambda\dfrac{dE^*_{zj}}{dr}-\dfrac{i\omega\mu_j}{r}\dfrac{dH^*_{zj}}{d\phi}\right), \\ E^*_{\phi j}=\dfrac{1}{p_j^2}\left(i\omega\mu_j\dfrac{dH^*_{zj}}{dr}-\dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dE^*_{zj}}{d\phi}\right), \\ H^*_{rj}=\dfrac{1}{p_j^2}\left(-i\lambda\dfrac{dH^*_{zj}}{dr}-\dfrac{\gamma_j}{r}\dfrac{dE^*_{zj}}{d\phi}\right), \\ H^*_{\phi j}=\dfrac{1}{p_j^2}\left(\gamma_j\dfrac{dE^*_{zj}}{dr}-\dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dH^*_{zj}}{d\phi}\right), \end{cases} \tag{6}$$

$p_j^2=\lambda^2+k_j^2,\quad k_j^2=-i\omega\mu_j\gamma_j$, а последние подчиняются уравнениям

$$\begin{cases} \dfrac{1}{r}\dfrac{d}{dr}\left(r\dfrac{dE^*_{zj}}{dr}\right)+\dfrac{1}{r^2}\dfrac{d^2E^*_{zj}}{d\phi^2}-p_j^2E^*_{zj}=0, \\ \dfrac{1}{r}\dfrac{d}{dr}\left(r\dfrac{dH^*_{zj}}{dr}\right)+\dfrac{1}{r^2}\dfrac{d^2H^*_{zj}}{d\phi^2}-p_j^2H^*_{zj}=0. \end{cases} \tag{7}$$

Уравнения (4) преобразуются к виду $r=r_1$:

$$\begin{cases} \left[E_{zj}^*\right]_{r=r_1} = -E_{z0}^*, \\ \left[H_{zj}^*\right]_{r=r_1} = -H_{z0}^*, \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(i\omega\mu_j \dfrac{dH_{zj}^*}{dr} - \dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dE_{zj}^*}{d\phi}\right)\right]_{r=r_1} = -\dfrac{1}{p_1^2}\left(i\omega\mu_1 \dfrac{dH_{z0}^*}{dr} - \dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dE_{z0}^*}{d\phi}\right), \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(\gamma_j \dfrac{dE_{zj}^*}{dr} - \dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dH_{zj}^*}{d\phi}\right)\right]_{r=r_1} = -\dfrac{1}{p_1^2}\left(\gamma_1 \dfrac{dE_{z0}^*}{dr} - \dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dH_{z0}^*}{d\phi}\right). \end{cases} \tag{8}$$

$r = r_j$, $j = 2, N$:

$$\begin{cases} \left[E_{zj}^*\right]_{r=r_j} = 0, \\ \left[H_{zj}^*\right]_{r=r_j} = 0, \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(i\omega\mu_j \dfrac{dH_{zj}^*}{dr} - \dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dE_{zj}^*}{d\phi}\right)\right]_{r=r_j} = 0, \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(\gamma_j \dfrac{dE_{zj}^*}{dr} - \dfrac{i\lambda}{r}\dfrac{dH_{zj}^*}{d\phi}\right)\right]_{r=r_j} = 0. \end{cases} \tag{9}$$

Разложим E_{zj}^*, H_{zj}^* и E_{z0}^*, H_{z0}^* в ряды по угловой координате:

$$\begin{cases} E_{zj}^* = \sum\limits_{n=0}^{\infty}(e_{nj}^c \cos n\overline{\varphi} + e_{nj}^s \sin n\overline{\varphi}), \\ H_{zj}^* = \sum\limits_{n=0}^{\infty}(h_{nj}^c \cos n\overline{\varphi} + h_{nj}^s \sin n\overline{\varphi}), \\ E_{z0}^* = \sum\limits_{n=0}^{\infty}(e_{n0}^c \cos n\overline{\varphi} + e_{n0}^s \sin n\overline{\varphi}), \\ H_{z0}^* = \sum\limits_{n=0}^{\infty}(h_{n0}^c \cos n\overline{\varphi} + h_{n0}^s \sin n\overline{\varphi}). \end{cases} \tag{10}$$

Здесь и далее $\overline{\varphi} = \varphi - \varphi_0$, $x = r\cos\varphi$, $y = r\sin\varphi$, $x_0 = r_0\cos\varphi_0$, $y_0 = r_0\sin\varphi_0$, $R = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0\cos\overline{\varphi}}$.

Подставляя уравнение (10) в (7)–(9), получаем уравнения (11)–(13), определяющие неизвестные функции $e_{nj}^{c,s}$, $h_{nj}^{c,s}$ (угловые гармоники):

$$\begin{cases} \dfrac{1}{r}\dfrac{d}{dr}\left(r\dfrac{de_{nj}^{c,s}}{dr}\right) - \left(\dfrac{n^2}{r^2} + p_j^2\right)e_{nj}^{c,s} = 0, \\ \dfrac{1}{r}\dfrac{d}{dr}\left(r\dfrac{dh_{nj}^{c,s}}{dr}\right) - \left(\dfrac{n^2}{r^2} + p_j^2\right)h_{nj}^{c,s} = 0. \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \left[e_{nj}^{c,s}\right]_{r=r_1} = -e_{n0}^{c,s}, \\ \left[h_{nj}^{c,s}\right]_{r=r_1} = -h_{n0}^{c,s}, \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(i\omega\mu_j \dfrac{dh_{nj}^{c,s}}{dr} \mp \dfrac{i\lambda n}{r} e_{nj}^{s,c}\right)\right]_{r=r_1} = -\dfrac{1}{p_1^2}\left(i\omega\mu_1 \dfrac{dh_{n0}^{c,s}}{dr} \mp \dfrac{i\lambda n}{r} e_{n0}^{s,c}\right), \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(\gamma_j \dfrac{de_{nj}^{c,s}}{dr} \mp \dfrac{i\lambda n}{r} h_{nj}^{s,c}\right)\right]_{r=r_1} = -\dfrac{1}{p_1^2}\left(\gamma_1 \dfrac{de_{n0}^{c,s}}{dr} \mp \dfrac{i\lambda n}{r} h_{n0}^{s,c}\right). \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} \left[e_{nj}^{c,s}\right]_{r=r_j} = 0, \\ \left[h_{nj}^{c,s}\right]_{r=r_j} = 0, \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(i\omega\mu_j \dfrac{dh_{nj}^{c,s}}{dr} \mp \dfrac{i\lambda n}{r} e_{nj}^{s,c}\right)\right]_{r=r_j} = 0, \\ \left[\dfrac{1}{p_j^2}\left(\gamma_j \dfrac{de_{nj}^{c,s}}{dr} \mp \dfrac{i\lambda n}{r} h_{nj}^{s,c}\right)\right]_{r=r_j} = 0, \quad j = 2, N. \end{cases} \tag{13}$$

Решение уравнений (11) есть линейная комбинация модифицированных функций Бесселя [37]:

$$\begin{cases} e_{nj}^{c,s} = C_{nj}^{c,s} I_n(p_j r) + P_{nj}^{c,s} K_n(p_j r), \\ h_{nj}^{c,s} = D_{nj}^{c,s} I_n(p_j r) + Q_{nj}^{c,s} K_n(p_j r), \ \operatorname{Re} p_j > 0. \end{cases} \tag{14}$$

Используя условия $E_{z1}^*, H_{z1}^*\big|_{r\to 0} \to 0$ и $E_{zN+1}^*, H_{zN+1}^*\big|_{r\to\infty} \to 0$, получаем $P_1^{c,s} = Q_1^{c,s} = C_{N+1}^{c,s} = D_{N+1}^{c,s} = 0$. Оставшиеся коэффициенты $C_{nj}^{c,s}, D_{nj}^{c,s}, j = 1, N$ и $P_{nj}^{c,s}, Q_{nj}^{c,s}, j = 2, N+1$ могут быть определены из граничных условий (12), (13). Способ определения угловых гармоник для нормального поля $e_{n0}^{c,s}, h_{n0}^{c,s}$, входящих в граничные условия, следующий.

Функция источника из уравнения (2) записывается в виде

$$U(P, P_0) = \delta(x - x_0)\,\delta(y - y_0)\,\delta(z - z_0)\,.$$

К уравнению (2) применяется преобразование Фурье по всем координатам, в результате чего получается алгебраическое уравнение для H_{z0}^+, в то время как $E_{z0}^+ = 0$. Выполняя обратное преобразование Фурье по координатам (x, y) для полученного выражения для магнитного поля H_{z0}^+ и разлагая в ряд определенное таким образом H_{z0}^*, имеем

$$\begin{cases} h_{n0}^c = -\dfrac{e^{-i\lambda z_0}}{2\pi} \cdot l_n \cdot p_1^2 \cdot M_z \cdot I_n(p_1 r_0) K_n(p_1 r), \quad l_0 = 1, l_n = 2, n \neq 0 \\ h_{n0}^s = 0, \\ e_{n0}^{c,s} = 0. \end{cases} \tag{15}$$

Учитывая (15), получаем $C_{nj}^c = D_{nj}^s = 0,\ j = 1, N$ и $P_{nj}^c = Q_{nj}^s = 0,\ j = 2, N+1$. Чтобы определить ненулевые коэффициенты, используется уравнение (14), а (12) и (13) представляются в матричной форме:

$$\vec{X} = \hat{V}\,\vec{\psi}_{N+1},$$
$$\hat{V} = \hat{W}_1^{-1}(r_1)\,\hat{W}_2(r_1)\,\hat{W}_2^{-1}(r_2)\,\hat{W}_3(r_2)\ldots\hat{W}_N^{-1}(r_N)\,\hat{W}_{N+1}[1,2](r_N)\,. \tag{16}$$

$$\hat{W}_j(r) = \begin{bmatrix} K_n(p_j r) & 0 & I_n(p_j r) & 0 \\ 0 & K_n(p_j r) & 0 & I_n(p_j r) \\ -\alpha_j\, K_n(p_j r) & \beta_j\, K_n^{'}(p_j r) & -\alpha_j\, I_n(p_j r) & \beta_j\, I_n^{'}(p_j r) \\ \varsigma_j\, K_n^{'}(p_j r) & \alpha_j\, K_n(p_j r) & \varsigma_j\, I_n^{'}(p_j r) & \alpha_j\, I_n(p_j r) \end{bmatrix}, \tag{17}$$

$$\hat{W}_j^{-1}(r) = p_j r \cdot \begin{bmatrix} I_n^{'}(p_j r) & \dfrac{\alpha_j}{\varsigma_j} I_n(p_j r) & 0 & -\dfrac{1}{\varsigma_j} I_n(p_j r) \\ -\dfrac{\alpha_j}{\beta_j} I_n(p_j r) & I_n^{'}(p_j r) & -\dfrac{1}{\beta_j} I_n(p_j r) & 0 \\ -K_n^{'}(p_j r) & -\dfrac{\alpha_j}{\varsigma_j} K_n(p_j r) & 0 & \dfrac{1}{\varsigma_j} K_n(p_j r) \\ \dfrac{\alpha_j}{\beta_j} K_n(p_j r) & -K_n^{'}(p_j r) & \dfrac{1}{\beta_j} K_n(p_j r) & 0 \end{bmatrix}. \tag{18}$$

$$\alpha_j = \frac{i\lambda n}{p_j^2 r},\ \beta_j = \frac{i\omega\mu_j}{p_j},\ \varsigma_j = \frac{\gamma_j}{p_j}\,.$$

$\hat{W}_{N+1}[1,2]$ – это первый и второй столбцы матрицы $\hat{W}_{N+1}$.

$$\vec{\psi}_{N+1} = \begin{bmatrix} P_{nN+1}^s \\ Q_{nN+1}^c \end{bmatrix}, \quad \vec{X} = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_z \dfrac{p_1^2}{\pi} I_n(p_1 r_0) \\ C_{n1}^s \\ D_{n1}^c \end{bmatrix}.$$

Множитель $e^{-i\lambda z_0}$ учтен в последующем выражении (20).

Из уравнений (16) с использованием (17) и (18) определяются неизвестные коэффициенты D_{n1}^c, а соотношения (10) и (14) дают выражение для Фурье-трансформации магнитного поля в первом слое:

$$H_{z1}^* = \sum_{n=0}^{\infty} D_{n1}^c I_n(p_1 r)\cos n\overline{\phi}. \tag{19}$$

Применяя обратное преобразование Фурье (5) к H_{z1}^* и H_{z0}^*, а также используя четность подынтегральных функций, окончательно имеем:

$$H_z = H_{z0} + \frac{M_z}{\pi}\int_0^{\infty}\left(\sum_{n=0}^{\infty} D_{n1}^c I_n(p_1 r)\cos n\overline{\varphi}\right)\cos\lambda(z - z_0)\,d\lambda,$$
$$H_{z0} = \frac{M_z e^{-k_1\overline{R}}}{2\pi\,\overline{R}^3}\left[1 + k_1\overline{R} - \frac{R^2}{\overline{R}^2}\left(3 + 3k_1\overline{R} + \left(k_1\overline{R}\right)^2\right)\right],\ \overline{R}^2 = R^2 + (z - z_0)^2,\ \mathrm{Re}\,k_j > 0. \tag{20}$$

Отметим, что решение задачи об электромагнитном поле, возбуждаемом смещенным с оси скважины магнитным диполем, выполнено в [38].

На основе полученного решения разработан вычислительный алгоритм для быстрого моделирования электромагнитных сигналов диэлектрического каротажа и выполнена его программная реализация. Высокая точность вычислений и быстродействие компьютерной программы достигается путем представления полученного решения в виде, сокращающем число вычислительных операций, использования необходимой нормировки, предотвращающей экспоненциальный рост / затухание компонентов решения, схем эффективного интегрирования быстро осциллирующих слабозатухающих функций и суммирования медленно сходящихся рядов Фурье. Разработка программы сопровождается оценками точности и обязательным внутренним и внешним тестированием. Компьютерная программа написана на языке программирования Fortran 77 и работает под операционной системой Microsoft Windows.

Моделирование сигналов диэлектрического зонда

Цель данного исследования – выяснить, как ведут себя электромагнитные сигналы в интересующем диапазоне значений электрофизических параметров, установить чувствительность сигналов к изменению параметров, что обеспечит в последующем возможность определения частотного спектра УЭС и ОДП в результате инверсии данных диэлектрического прибора.

Для анализа поведения сигналов при изменении УЭС и ОДП выбрана модель среды «скважина – пласт». УЭС скважины $\rho_c = 2$ Ом·м, ОДП – $\varepsilon_c^* = 1$, радиус – $r_c = 0.108$ м. Учитывая конечный размер катушек, при моделировании источник и приемник электромагнитного поля были расположены на расстоянии 1 см от стенки скважины.

На рис. 2 приведены зависимости разности фаз и затухания амплитуд от УЭС и ОДП пласта для зонда 0,5 м на частотах 20–500 МГц.

На низкой частоте 20 МГц (рис. 2, *а*, *б*) преобладает зависимость измеряемых сигналов от сопротивления, чувствительность к диэлектрической проницаемости повышается при увеличении УЭС, особенно для разности фаз.

На частоте 100 МГц (рис. 2, *в*, *г*) для сопротивлений меньше 10 Ом·м разность фаз зависит как от УЭС, так и от ОДП, при увеличении сопротивления зависимость от УЭС практически исчезает, исключая только малые значения ОДП. Для затухания амплитуд зависимость от УЭС и ОДП наблюдается во всем диапазоне параметров, но для высоких значений УЭС и ОДП – на фоне небольших отрицательных значений сигнала.

Видимые артефакты (резкая смена цвета на рисунках, отражающая уровень сигнала) связаны с переходом значения э.д.с. через ноль.

На высокой частоте 500 МГц (рис. 2, *д*, *е*) зависимость разности фаз от УЭС еще более ослабевает. Затухание амплитуд чувствительно и к УЭС, и к ОДП. В целом на высоких частотах (100–500 МГц) разность фаз и затухание амплитуд ведут себя качественно по-разному, что видно при сравнении рисунков: разность фаз слабо зависит от сопротивления, а для амплитуды сохраняется зависимость от обоих параметров.

При уменьшении длины зонда снижается уровень сигнала, а качественное поведение сигналов сохраняется и соответствует описанному выше. Также на высокой частоте количество переходов э.д.с. через ноль сокращается – картина распределения уровня сигналов становится более гладкой.

При увеличении длины зонда уровень сигналов увеличивается, на высокой частоте количество переходов э.д.с. через ноль возрастает, а основные выводы о поведении сигналов остаются в силе.

Так как определение УЭС и ОДП происходит на одной частоте по измеренным разности фаз и затуханию амплитуд в нескольких трехкатушечных зондах, то, возможно, целесообразно иметь больше рабочих частот (пять-восемь) в диапазоне от 20 до 500 МГц для обеспечения устойчивости подбора электрофизических параметров с использованием сглаживания частотных спектров.

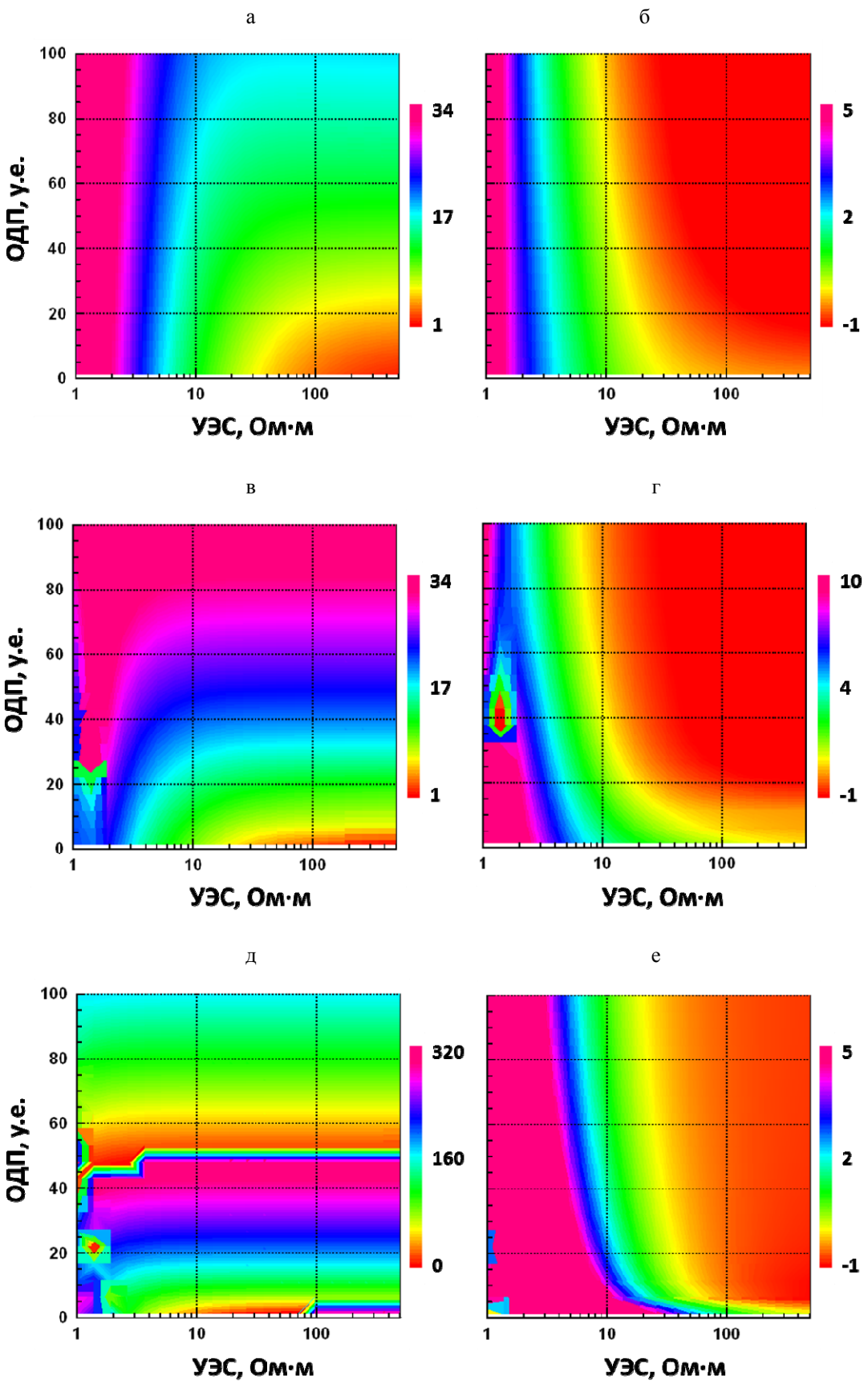

Рис. 2. Разность фаз (*а*, *в*, *д*) и затухание амплитуд (*б*, *г*, *е*) в зависимости от УЭС и ОДП пласта: *а*, *б* – зонд 0,5 м, частота 20 МГц; *в*, *г* – зонд 0,5 м, частота 100 МГц; *д*, *е* – зонд 0,5 м, частота 500 МГц

Таким образом, в выбранном частотном и геометрическом диапазонах конструктивных параметров прибора существует устойчивая зависимость измеряемых характеристик от электрофизических параметров пласта, пересекаемого скважиной. Разность фаз и затухание амплитуд демонстрируют качественно разное поведение, являясь, таким образом, независимыми измерениями, что важно для надежной инверсии данных диэлектрического зонда.

Заключение

Для развития методов и создания новых приборов электромагнитных зондирований в скважинах выполнена разработка теоретической базы математического моделирования данных диэлектрического каротажа, необходимая для установления возможностей его применения к изучению залежей углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами. Разработаны быстрые программно-алгоритмические средства численного моделирования высокочастотных электромагнитных сигналов на основе полученного решения прямой задачи диэлектрического каротажа в рамках слоисто-однородных моделей сред. Масштабное моделирование и сравнительный анализ амплитудно-фазовых характеристик высокочастотного электромагнитного поля позволили установить их устойчивую зависимость от частотного спектра электрофизических параметров в широком диапазоне частот – от 20 до 500 МГц. Расчеты показали, что на измеряемые электромагнитные сигналы значительное влияние оказывают и УЭС, и ОДП. Разработанная теоретическая база и всесторонний анализ результатов численного моделирования в дальнейшем позволит выполнить научное обоснование параметров и оптимальное проектирование конфигурации новой электромагнитной зондирующей системы, предназначенной для изучения электрофизических свойств залежей углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами.

Список литературы

1. *Аксельрод С. М.* К измерению диэлектрической проницаемости горных пород в условиях скважины // Прикладная геофизика. 1968. Вып. 52.

2. *Брылкин Ю. Л., Дубман Л. И.* О диэлектрической проницаемости влажных песчаных пород // Электромагнитные методы исследования скважин. Новосибирск: Наука, 1979. С. 233-242.

3. *Брылкин Ю. Л., Дубман Л. И.* О диэлектрической проницаемости горных пород осадочного происхождения // Геология и геофизика. 1972. № 1. С. 117-121.

4. *Даев Д. С., Денисов С. Б.* О высокочастотном индукционном каротаже // Разведочная геофизика. М.: Недра, 1970. Вып. 42. С. 106-123.

5. *Даев Д. С., Денисов С. Б., Костин А. И.* Измерение удельного сопротивления пород методом волнового каротажа проводимости // Проблемы нефти и газа Тюмени: Науч.-техн. сб. Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1977. Вып. 33. С. 3–7.

6. *Кауфман А. А., Антонов Ю. Н.* Диэлектрический индуктивный каротаж. Новосибирск: Наука, 1971. 140 с.

7. *Даев Д. С.* Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. М.: Недра, 1974. 192 с.

8. *Денисов С. Б.* Определение коллекторских параметров пластов по данным диэлектрического каротажа в карбонатных разрезах // Нефтегазовая геология и геофизика. 1981. Вып. 11. С. 29–32.

9. *Денисов С. Б., Макагонова С. К.* Интерпретация кривых волнового диэлектрического каротажа в пластах ограниченной мощности // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1978. Вып. 92. С. 189–196.

10. *Денисов С. Б., Макагонова С. К.* Принципы интерпретации данных диэлектрического каротажа при измерении нескольких характеристик электрического поля // Нефтегазовая геология и геофизика. 1981. Вып. 2. С. 38–42.

11. *Панич И. М.* Исследование возможностей импедансных зондов и зондов с частотно-геометрической фокусировкой токов проводимости при диэлектрическом каротаже скважин: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Новосибирск, 1979. 19 с.

12. *Bittar M., Li J., Kainer G., Cherry R., Torres D., McCoy D.* A modern microwave formation evaluation sensor and its applications in reservoir evaluation // Transactions of the SPWLA 51th Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). Perth, Australia, 2010. Paper B.

13. *Hizem M., Budan H., Deville B., Faivre O., Mossé L., Simon M.* Dielectric dispersion: a new wireline petrophysical measurement // Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). Denver, Colorado, USA, 2008. Paper 116130.

14. *Seleznev N., Habashy T., Boyd A., Hizem M.* Formation properties derived from a multi-frequency dielectric measurement // Transactions of the SPWLA 47th Annual Logging Symposium (June 4–7, 2006). Veracruz, Mexico, 2006. Paper VVV.

15. *Toumelin E., Torres-Verdín C., Bona N.* A new pore-scale framework for the simulation and interpretation of wide-band dielectric measurements // Abstracts of the 19th Annual International Symposium (August 21–25, 2005). Toronto, Canada, 2005. Paper SCA2005-21.

16. *Аксельрод С. М.* Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. 2007. Вып. 10 (163). С. 103–126.

17. *Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Эпов М. И.* Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 12. С. 1942–1951.

18. *Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Эпов М. И.* Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в пластах конечной мощности, вскрытых на биополимерных и нефтяных буровых растворах // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 11. С. 1803–1813.

19. *Эпов М. И., Глинских В. Н.* Анализ пространственной чувствительности относительных характеристик в задачах высокочастотного электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1168–1175.

20. *Эпов М. И., Глинских В. Н.* Быстрое двумерное моделирование высокочастотного электромагнитного поля для задач каротажа // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 9. С. 942–952.

21. *Эпов М. И., Глинских В. Н.* Линеаризация относительных характеристик высокочастотного магнитного поля в двумерных проводящих средах // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 2. С. 266–274.

22. *Эпов М. И., Глинских В. Н.* Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. Новосибирск: Гео, 2005. 98 с.

23. *Anderson B., Barber T., Luling M., Sen P.* Observation of large dielectric effects on induction logs, or, can source rocks be detected with induction measurements // Transactions of the SPWLA 47th Annual Logging Symposium (June 4–7, 2006). Veracruz, Mexico, 2006. Paper OOO.

24. *Anderson B., Barber T., Lüling M., Sen P., Taherian R., Klein J.* Identifying potential gas-producing shales from large dielectric permittivities measured by induction quadrature signals // Transactions of the SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008). Edinburgh, Scotland, 2008. Paper HHHH.

25. *Anderson B., Barber T., Lüling M., Rasmus J., Sen P., Tabanou J., Haugland M.* Observations of large dielectric effects on LWD propagation resistivity logs // Transactions of the SPWLA 48th Annual Logging Symposium (June 3–6, 2007). Austin, Texas, United States, 2007. Paper BB.

26. *Epov M. I., Suhorukova C. V., Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Nechaev O. V., Surodina I. V.* Effective electromagnetic log data interpretation in realistic reservoir models // Open Journal of Geology. 2013. Vol. 3. No. 2B. P. 81–86.

27. *Аксельрод С. М.* Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. 2012. Вып. 4 (214). С. 78–112.

28. *Ельцов Т. И., Доровский В. Н., Гапеев Д. Н.* Низкочастотные диэлектрические спектры пород, насыщенных водонефтяной смесью // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 8. С. 1270–1281.

29. *Эпов М. И., Бобров П. П., Миронов В. Л., Репин А. В.* Диэлектрическая релаксация в глинистых нефтесодержащих породах // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 9. С. 1302–1309.

30. *Эпов М. И., Миронов В. Л., Бобров П. П., Савин И. В., Репин А. В.* Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05–16 ГГц // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 5. С. 613–618.

31. *Эпов М. И., Савин И. В., Миронов В. Л.* Диэлектрическая температурная модель влажных нефтесодержащих пород в диапазоне частот от 0.5 до 15 ГГц // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 7. С. 912–919.

32. *Garrouch A., Alsafran E., Garrouch K.* A classification model for rock typing using dielectric permittivity and petrophysical data // Journal of Geophysics and Engineering. 2009. Vol. 6. No. 3. P. 311–323.

33. *Morales J., Trejo A., Cabrera M., Decoster E., Gea I.* Schlumberger. Multifrequency dielectric tool identifies oil/water contacts within complex mexican carbonates in oil-based mud // Transactions of the SPWLA 56th Annual Logging Symposium (June 18–22, 2015). Long Beach, California, USA, 2015. Paper J.

34. *Toumelin E., Torres-Verdin C.* Pore-scale simulation of kHz-GHz electromagnetic dispersion of rocks: effects of rock morphology, pore connectivity, and electrical double layers // Transactions of the SPWLA 50th Annual Logging Symposium (June 21–24, 2009). The Woodlands, Texas, USA, 2008. Paper RRR.

35. *Кауфман А. А., Каганский А. М., Кривопуцкий В. С.* Радиальные характеристики индукционных зондов, смещенных с оси скважины // Геология и геофизика. 1974, № 7. С. 102–106.

36. *Табаровский Л. А.* Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск: Наука, 1975. 144 с.

37. *Градштейн И. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.

38. *Nikitenko M., Itskovich G., Seryakov A.* Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentred magnetic dipole // Radio Science. 2016. Vol. 51. P. 573–588.

Материал поступил в редколлегию 25.09.2018

V. N. Glinskikh [1–3], M. N. Nikitenko [1]

[1] *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS*
3 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

[2] *Novosibirsk State University*
1 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

[3] *Novosibirsk State Technical University*
20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru, NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

THEORETICAL-ALGORITHMICAL BASE AND COMPUTER SIMULATION OF DIELECTRIC LOGGING DATA TO STUDY FREQUENCY SPECTRUM OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT

The article is devoted to the development of theoretical base for computer simulation of dielectric logging data with the aim of substantiating new import-substituting equipment for logging oil and gas wells. We have developed algorithms and implemented fast computer programs for the

simulation of high-frequency electromagnetic signals within the framework of homogeneously layered models of environment. Based on the results of large-scale simulation of the amplitude-phase characteristics of a high-frequency field, their dependence on the frequency spectrum of electrophysical parameters was established. The carried out research allows executing scientific substantiation and optimal design of a new electromagnetic sounding system.

Keywords: computer simulation, direct problem, geoelectric model, electrophysical parameters, frequency dispersion, dielectric logging.

References

1. Akselrod S. M. Dielectric constant logging. *Prikladnaya Geofizika*, 1968, issue 52. (in Russ.)

2. Brylkin Yu. L., Dubman L. I. Dielectric constants of water-saturated sands. In: Antonov, Yu. N. (ed.). Electromagnetic Logging Methods. Novosibirsk, Nauka, 1979, p. 233–242. (in Russ.)

3. Brylkin Yu. L., Dubman L. I. Dielectric constants of sedimentary rocks. *Geologiya i Geofizika*, 1972, vol. 13, no. 1, p. 117–121. (in Russ.)

4. Daev D. S., Denisov S. B. High-frequency electromagnetic logging. *Razvedochnaya Geofizika*, 1970, vol. 42, p. 106–123. (in Russ.)

5. Daev D. S., Denisov S. B., Kostin A. I. Measurement of electrical resistivity of rocks by the method of wave conductivity logging. *Problems of oil and gas in Tyumen: scientific-technical transactions*. Tyumen, ZapSibNIGNI, 1977, issue 33, p. 3–7. (in Russ.)

6. Kaufman A. A., Antonov Yu. N. Dielectric Constant Electromagnetic Logging. Novosibirsk, Nauka, 1971, 140 p. (in Russ.)

7. Daev D. S. High-frequency electromagnetic methods of well logging. Moscow, Nedra, 1974, 192 p. (in Russ.)

8. Denisov S. B. Determination of reservoir parameters from dielectric logging data in carbonate cross sections. *Neftegazovaya geologiya i geofizika*, 1981, issue 11, p. 29–32. (in Russ.)

9. Denisov S. B., Makagonova S. K. Interpretation of wave dielectric logs in layers of finite thickness. *Prikladnaya geofizika*. Moscow, Nedra, 1978, issue 92, p. 189–196. (in Russ.)

10. Denisov S. B., Makagonova S. K. Principles of dielectric logging data interpretation when measuring several electric field characteristics. *Neftegazovaya geologiya i geofizika*, 1981, issue 2, p. 38–42. (in Russ.)

11. Panich I. M. Investigation of the capabilities of impedance tools and tools with frequency-geometric focusing of conduction currents during dielectric logging of wells. Abstract of dissertation of candidate in technical sciences. Novosibirsk, 1979, 19 p. (in Russ.)

12. Bittar M., Li J., Kainer G., Cherry R., Torres D., McCoy D. A modern microwave formation evaluation sensor and its applications in reservoir evaluation. *Transactions of the SPWLA 51th Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010)*. Perth, Australia, 2010, paper B.

13. Hizem M., Budan H., Deville B., Faivre O., Mossé L., Simon M. Dielectric dispersion: a new wireline petrophysical measurement. *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008)*. Denver, Colorado, USA, 2008, paper 116130.

14. Seleznev N., Habashy T., Boyd A., Hizem M. Formation properties derived from a multi-frequency dielectric measurement. *Transactions of the SPWLA 47th Annual Logging Symposium (June 4–7, 2006)*. Veracruz, Mexico, 2006, paper VVV.

15. Toumelin E., Torres-Verdín C., Bona N. A new pore-scale framework for the simulation and interpretation of wide-band dielectric measurements. *Abstracts of the 19th Annual International Symposium (August 21–25, 2005)*. Toronto, Canada, 2005, paper SCA2005-21.

16. Akselrod S. M. Frequency dependence of electric properties in rocks: effects on resistivity estimates (according to published evidence from outside Russia). *Karotazhnik*, 2007, no. 10, p. 103–126. (in Russ.)

17. Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Epov M. I. Processing high-frequency electromagnetic logs from conducting formations: linearized 2D forward and inverse solutions with regard to eddy currents. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 12, p. 1515–1521. (in Russ.)

18. Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Epov M. I. Numerical modeling and inversion of electromagnetic logs in the wells drilled with biopolymer and oil-mud. Russian *Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 11, p. 1409–1416. (in Russ.)

19. Epov M. I., Glinskikh V. N. Space sensitivity of relative parameters in high-frequency electromagnetic logging. *Russian Geology and Geophysics*, 2005, vol. 46, no. 11, p. 1168–1175. (in Russ.)

20. Epov M. I., Glinskikh V. N. Fast two-dimensional simulation of high-frequency electromagnetic field in induction logging. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 9, p. 904–915. (in Russ.)

21. Epov M. I., Glinskikh V. N. Linearization of relative parameters of a high-frequency magnetic field in two-dimensional conducting media. *Russian Geology and Geophysics*, 2004, vol. 45, no. 2, p. 247–257. (in Russ.)

22. Epov M. I., Glinskikh V. N. Induction Logging: Forward Modeling and Inversion. Novosibirsk, Geo Publ., 2005, 98 p. (in Russ.)

23. Anderson B., Barber T., Luling M., Sen P. Observation of large dielectric effects on induction logs, or, can source rocks be detected with induction measurements. *Transactions of the SPWLA 47th Annual Logging Symposium (June 4–7, 2006)*. Veracruz, Mexico, 2006, paper OOO.

24. Anderson B., Barber T., Lüling M., Sen P., Taherian R., Klein J. Identifying potential gas-producing shales from large dielectric permittivities measured by induction quadrature signals. *Transactions of the SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008)*. Edinburgh, Scotland, 2008, paper HHHH.

25. Anderson B., Barber T., Lüling M., Rasmus J., Sen P., Tabanou J., Haugland M. Observations of large dielectric effects on LWD propagation resistivity logs. *Transactions of the SPWLA 48th Annual Logging Symposium (June 3–6, 2007)*. Austin, Texas, USA, 2007, paper BB.

26. Epov M. I. Suhorukova C. V., Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Nechaev O. V., Surodina I. V. Effective electromagnetic log data interpretation in realistic reservoir models. *Open Journal of Geology*, 2013, vol. 3, no. 2B, p. 81–86.

27. Akselrod S. M. New trends in dielectric constant logging (according to published evidence from outside Russia). *Karotazhnik*, 2012, no. 4, p. 78–112. (in Russ.)

28. Eltsov T. I., Dorovsky V. N., Gapeev D. N. Dielectric spectra of water – oil – saturated porous media for the khz range and determination of volume fractions of system components. *Russian geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 8, p. 1009–1018. (in Russ.)

29. Epov M. I., Bobrov P. P., Mironov V. L., Repin A.V. Dielectric relaxation in oil-bearing clayey rocks. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 9, p. 1028–1034. (in Russ.)

30. Epov M. I., Mironov V. L., Bobrov P. P., Savin I. V., Repin A. V. Dielectric spectroscopy of oil-bearing rocks at 0.05–16 GHz. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 5. p. 470–474. (in Russ.)

31. Epov M. I., Savin I. V., Mironov V. L. A temperature-dependent dielectric model for water- and oil-containing rocks in the frequency range from 0.5 to 15 GHz. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 7, p. 698–703. (in Russ.)

32. Garrouch A., Alsafran E., Garrouch K. A classification model for rock typing using dielectric permittivity and petrophysical data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, vol. 6, no. 3, p. 311–323.

33. Morales J., Trejo A., Cabrera M., Decoster E., Gea I., Schlumberger. Multifrequency dielectric tool identifies oil/water contacts within complex mexican carbonates in oil-based mud. *Transactions of the SPWLA 56th Annual Logging Symposium (June 18–22, 2015)*. Long Beach, California, USA, 2015, Paper J.

34. Toumelin E., Torres-Verdin C. Pore-scale simulation of kHz-GHz electromagnetic dispersion of rocks: effects of rock morphology, pore connectivity, and electrical double layers. *Transactions of the SPWLA 50th Annual Logging Symposium (June 21–24, 2009)*. The Woodlands, Texas, USA, 2008, Paper RRR.

35. Kaufman A. A., Kagansky A. M., Krivoputskiy V. S. Radial characteristics of induction tools displaced from the borehole axis. *Geology and geophysics*, 1974, no. 7, p. 102–106. (in Russ.)

36. Tabarovsky L. A. Application of the integral equations method to geoelectric problems. Novosibirsk, Nauka, 1975, 144 p. (in Russ.)

37. Gradshtein I. S., Ryzhik I. M. Tables of integrals, series and products. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 1100 p. (in Russ.)

38. Nikitenko M., Itskovich G., Seryakov A. Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentred magnetic dipole. *Radio Science*, 2016, vol. 51, p. 573–588.

Received 25.09.2018

For citation:

Glinskikh V. N., Nikitenko M. N. Theoretical-Algorithmical Base and Computer Simulation of Dielectric Logging Data to Study Frequency Spectrum of Electrophysical Parameters of Geological Environment. *Vestnik NSU. Series*: *Information Technologies*, 2018, vol. 16, no. 4, p. 41–55. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-41-55