

**ЛИНЕАРИЗОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ  
С УЧЕТОМ ТОКОВ СМЕЩЕНИЯ**

**В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, М.И. Эпов**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Разработаны эффективные программно-алгоритмические средства быстрого двумерного моделирования и инверсии данных высокочастотного электромагнитного каротажа для реконструкции пространственного распределения удельной электропроводности (УЭП) и относительной диэлектрической проницаемости (ОДП) горных пород. Решение прямой задачи основано на линеаризованных представлениях относительных амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля в двумерных проводящих средах с учетом токов смещения. Для повышения точности моделирования предложен способ выбора фоновой модели, основанный на анализе распределения вихревых токов в неоднородной модели. Решение обратной задачи электромагнитного каротажа включает псевдообращение матрицы чувствительностей относительных амплитудно-фазовых характеристик. Совместная двумерная инверсия разностей фаз и относительных амплитуд повышает достоверность определения пространственного распределения электрофизических параметров. На синтетических и практических данных электромагнитного каротажа показаны возможности определения ОДП на интервалах сложнопостроенных коллекторов терригенных и карбонатных разрезов.

*Прямая и обратная задачи, моделирование и инверсия, разность фаз, относительная амплитуда, удельная электропроводность, относительная диэлектрическая проницаемость.*

**PROCESSING HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC LOGS FROM CONDUCTING  
FORMATIONS: LINEARIZED 2D FORWARD AND INVERSE SOLUTIONS  
WITH REGARD TO EDDY CURRENTS**

**V.N. Glinskikh, M.N. Nikitenko, and M.I. Epov**

High-performance algorithms and software have been designed for fast 2D forward modeling and inversion of high-frequency electromagnetic logs to recover the patterns of electrical conductivity and relative permittivity (dielectric constant) of rocks. Forward modeling implies linear representation, with regard to eddy current, of attenuations and phase shifts of electromagnetic fields propagating in 2D conducting formations. In order to improve the modeling quality, the background model is chosen proceeding from the eddy current pattern in a heterogeneous subsurface. The inverse solution is obtained by pseudoinversion of the sensitivity matrix of relative amplitudes and phases. Joint 2D inversion of phase shifts and attenuations improves the reliability of the inferred spatial conductivity distribution and allows estimating permittivity. The reported numerical experiments on inversion of synthetic and field EM logs prove the possibility of estimating the permittivity of complex terrigenous and carbonate reservoirs with water- and oil-filled porosity.

*Forward modeling, inversion, phase shift, attenuation, electrical conductivity, relative dielectric permittivity*

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение пространственного распределения ОДП горных пород, окружающих скважину, является целью диэлектрического каротажа (ДК). Создание аппаратуры отечественного ДК относится к середине прошлого века [Аксельрод, 1968]. Развитие теоретической и аппаратурной базы связано с индуктивным [Кауфман и др., 1971] и волновым ДК [Даев и др., 1970; Брылкин и др., 1972, 1979], использующим мега- и гигагерцовый диапазоны частот соответственно. В настоящее время в компаниях Халлибертон и Шлюмберже применяется аппаратура волнового ДК. Она успешно применяется в

различных геологических условиях, где традиционные комплексы геофизических исследований и подходы к интерпретации недостаточно эффективны [Seleznev et al., 2006; Bittar et al., 2010]. Наряду с аппаратурой ДК изучение ОДП горных пород проводят по данным электромагнитного каротажа в диапазоне частот от сотен килогерц до единиц мегагерц. Основные результаты интерпретации связаны с выявлением эффекта частотной дисперсии комплексной УЭП и определением ОДП для оценки характера насыщения пород-коллекторов и изучения глинистых отложений [Anderson et al., 2006, 2007; Аксельрод, 2007]. В последние годы наблюдается высокий интерес к изучению механизмов и установлению зависимостей электромагнитных свойств горных пород от возбуждающего поля на основе скважинных измерений, лабораторных исследований на образцах керна и математического моделирования [Toumelin et al., 2008, 2009; Эпов и др., 2009, 2010, 2011, 2012; Ельцов и др., 2011; Аксельрод, 2012]. Обзор по современному состоянию и развитию ДК детально рассмотрен в работе [Аксельрод, 2012].

Дисперсия комплексной УЭП 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 оказывают не только диффузионные, но и волновые процессы в среде [Технология..., 2000; Эпов, Глинских, 2005; Эпов и др., 2010]. Сейчас накоплен практический опыт количественной интерпретации данных электромагнитного каротажа для определения ОДП и установления ее связей с характером насыщения и вещественным составом горных пород. К основным особенностям распределения электрофизических параметров по результатам численной инверсии данных электромагнитного каротажа можно отнести следующее. Водонасыщенные коллекторы, поровое пространство которых заполнено минерализованной пластовой водой, характеризуются высокими значениями УЭП и повышенными значениями ОДП. В то время как в нефтенасыщенных пластах, имеющих низкие значения УЭП, величины ОДП пониженные. На интервалах коллекторов повышение значений ОДП происходит при увеличении содержания в пластах свободной воды, а также глинисто-связанной. Глинистым отложениям свойственны высокие значения УЭП и ОДП. При изучении карбонатных разрезов, характеризующихся низкими значениями УЭП, с использованием высокочастотного электромагнитного каротажа становится возможным оценка ОДП пород-коллекторов.

Для высокочастотного электромагнитного каротажа измерение относительных амплитуд позволяет перейти к восстановлению полного набора электрофизических параметров горных пород. Независимые дополнительные измерения повышают достоверность определения пространственного распределения УЭП, а также делают возможным оценку ОДП. Очевидно, что совместное использование разностей фаз и относительных амплитуд обеспечивают значительное сужение областей эквивалентности (неопределенности) при определении электрофизических параметров. Учет волновых процессов для высокочастотного диапазона возможен только при решении прямых задач в полной постановке. Прямое использование решений на основе векторного метода конечных элементов и конечных разностей до сих пор ограничивается высокой ресурсоемкостью алгоритмов, что затрудняет их применение для оперативной интерпретации практических данных. Для приближенного моделирования широко известны линейные, квазилинейные и нелинейные аппроксимации электромагнитного поля в неоднородных средах [Cheryuka et al., 1998; Эпов, Глинских, 2005; Zhdanov, 2009]. Применительно к высокочастотному каротажу рассматриваются линеаризованные представления электромагнитного поля на оси симметрии двумерной модели. В данной постановке возможен приближенный учет токов смещения как диффузионного вклада от волновых процессов, обусловленных пространственным распределением ОДП [Могилатов, 1999; Эпов, Глинских, 2005].

Настоящая работа посвящена созданию эффективных программно-алгоритмических средств быстрого двумерного моделирования и совместной инверсии диаграмм разностей фаз и относительных амплитуд для восстановления пространственного распределения УЭП и ОДП.

## РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ

Приближенный подход к решению двумерной прямой задачи электромагнитного каротажа состоит в следующем. Модель описывает пересеченную вертикальной цилиндрической скважиной пачку пластов с горизонтальными плоскостями границами, в которых есть одна или несколько коаксиально-цилиндрических зон. В цилиндрической системе координат вертикальная ось является осью симметрии образованных осесимметричных тороидов прямоугольного сечения и стороннего индуктивного источника. Соосные индуцированные в среде вихревые токи не пересекают границ, поэтому электромагнитное поле определяется только магнитной модой. Общая векторная задача сводится к решению скалярного уравнения Гельмгольца для одной ненулевой тангенциальной компоненты электрического поля.

Используя метод возмущений, волновой процесс можно связать с пространственными вариациями ОДП и описать дополнительным сторонним источником [Могилатов, 1999; Эпов, Глинских, 2005].

Линеаризованные представления относительных амплитудно-фазовых характеристик в двумерной проводящей модели с учетом токов смещения можно представить в виде

$$\Delta\varphi \approx \Delta\varphi^b + \sum_{i=1}^m \Delta\sigma_i \Delta G_i' + \sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i \Delta G_i'' , \quad (1)$$

$$\Delta A \approx \Delta A^b \exp \left( \sum_{i=1}^m \Delta\sigma_i \Delta G_i'' + \sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i \Delta G_i' \right) . \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi^b$  — разность фаз,  $\Delta A^b$  — отношение амплитуд в фоновой модели,  $\Delta\sigma_i$ ,  $\Delta\varepsilon_i$  — возмущения УЭП и ОДП тороидов, образованных взаимным пересечением горизонтальных и вертикальных границ двумерной геоэлектрической модели,  $\Delta G$  — соответствующие псевдогеометрические факторы разности фаз и относительной амплитуды.

Важным следствием этих выражений является следующее. Линеаризованные относительные представления амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля в двумерных проводящих средах учитывают влияние токов смещения. Производными измеряемых величин по соответствующему модельному параметру являются псевдогеометрические факторы, аналогичные используемым в теории Долля. Относительные амплитудно-фазовые характеристики зависят от одного и того же набора псевдогеометрических факторов и представляются как суперпозиция вкладов в сигнал от отдельных элементов среды. Поскольку измеряемые величины зависят линейно от модельных параметров, то можно эффективно применять линейную инверсию для решения обратной задачи.

Обратим внимание на производные измеряемых сигналов по геометрическим параметрам. Исходная задача линеаризована по электрофизическим параметрам и предполагает, что геометрия модели определена заранее. Вместе с тем производную по координате горизонтальной или радиальной границы можно описать как линейную комбинацию производных по электрофизическим параметрам для областей возмущений, разделяющихся этой границей. Используя линейные комбинации производных по электрофизическим параметрам нескольких областей возмущений, можно формально получить соответствующие выражения производных по координатам границ. Эти выражения также включают два сомножителя: первый характеризует относительный контраст электрофизических параметров граничащих областей; второй является псевдогеометрическим фактором, который описывается однократным интегралом вдоль соответствующей границы. Использование этого представления при решении обратной задачи позволяет эффективно проводить уточнение положения горизонтальных границ пластов и радиальных границ цилиндрических зон.

## О ВЫБОРЕ ФОНОВОЙ МОДЕЛИ

Точность линейных аппроксимаций зависит от выбора фоновой модели, размеров неоднородности и относительных контрастов электрофизических параметров в среде. Очевидно, что геологические среды, характеризующиеся существенной вертикальной неоднородностью разреза, должны описываться горизонтально-слоистой моделью, а при преобладании радиальной в прискважинной зоне — цилиндрически-слоистой. При этом необходимо отметить, что усложнение фоновых моделей влечет за собой использование более сложных функций Грина и соответственное увеличение ресурсоемкости вычислений.

Как показали масштабные численные эксперименты, для значительного числа моделей флюидонасыщенных терригенных пластов-коллекторов, описывающих типичные геоэлектрические ситуации, результаты использования линеаризованных решений (1), (2) с однородной фоновой средой удовлетворительные. Относительные погрешности приближенного численного моделирования в подавляющем большинстве не превосходят аппаратных погрешностей измерений. Малое время вычислений делает возможным их применение для инверсии в реальном масштабе времени.

Выбор параметров однородной фоновой модели для многочастотных наблюдений может быть сделан многими способами. Самые простые состоят в определении параметров как результатов трансформаций вычисленных сигналов на предыдущих по глубине точках или частотах. Общее же решение должно учитывать как условия возбуждения электромагнитного поля, так и пространственное распределение электрофизических параметров, и может быть основано на анализе распределения вихревых токов в неоднородной среде.

По аналогии с определением интегральной электропроводности, описывающей усредненную УЭП по объему, параметры однородной фоновой модели могут быть определены путем усреднения вихревых токов по областям возмущений. Учитывая, что относительные амплитудно-фазовые характеристики описываются одним и тем же набором псевдогеометрических факторов, а также при условии

малости линейных добавок в выражениях (1), (2), параметры  $\sigma^b$  и  $\varepsilon^b$  однородной фоновой модели могут быть представлены следующим образом

$$\sigma^b \approx \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i \Delta G'_i \sum_{i=1}^m \Delta G'_i + \sum_{i=1}^m \sigma_i \Delta G''_i \sum_{i=1}^m \Delta G''_i}{g^2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon^b \approx \frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i \Delta G'_i \sum_{i=1}^m \Delta G'_i + \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \Delta G''_i \sum_{i=1}^m \Delta G''_i}{g^2}, \quad (4)$$

где  $g$  определяется как

$$g^2 = \left[ \sum_{i=1}^m \Delta G'_i \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^m \Delta G''_i \right]^2.$$

Здесь  $m$  — число подобластей с разными значениями электрофизических параметров. Поскольку функции  $\Delta G$  зависят от искоемых параметров, последние могут быть найдены с использованием итерационного процесса, который, как правило, быстро сходится (не более 2—3 итераций).

Анализ пространственного распределения вихревых токов (токи проводимости и смещения) в областях возмущения электрофизических параметров делает возможным определение параметров однородной фоновой среды почти эквивалентной неоднородной. Применение такого подхода к выбору фоновой модели позволяет в линейных приближениях (1), (2) наилучшим образом описать референтную часть сигнала и удовлетворительно возмущенную. Разработанные программно-алгоритмические средства численного моделирования обладают приемлемой для практики точностью, характеризуются высокой скоростью вычислений и предназначены для оперативной интерпретации.

#### РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Решение обратной задачи состоит в обращении системы линейных алгебраических уравнений, определяемой выражениями (1), (2) и связывающей экспериментальные данные и модельные параметры

$$\delta \mathbf{f} \approx \hat{B} \delta \mathbf{p}. \quad (5)$$

Здесь  $\delta \mathbf{f}$  — относительные приращения разности фаз и отношения амплитуд, порожденные  $\delta \mathbf{p}$  — относительными возмущениями УЭП и ОДП,  $\hat{B}$  — матрица коэффициентов, в общем случае содержащая производные измеряемых величин по модельным параметрам. Отметим, что вектор  $\delta \mathbf{p}$  также может содержать соответствующие относительные приращения по геометрическим параметрам.

Элементы векторов относительных приращений измеряемых величин  $\delta \mathbf{f}$  и модельных параметров  $\delta \mathbf{p}$  в (5) определим как

$$\delta f_j = \frac{f_j - f_j^0}{f_j^0} \quad \text{и} \quad \delta p_i = \frac{p_i - p_i^0}{p_i^0},$$

где индекс  $j$  — номер измерения,  $n$  — их число, индекс  $i$  — номер области возмущения электрофизических параметров,  $m$  — их число,  $f_j$  — экспериментальные и  $f_j^0$  — синтетические данные, соответствующие вектору модельных параметров  $\mathbf{p}^0$ .

Коэффициенты матрицы  $\hat{B}$  определяются логарифмическими производными или псевдогеометрическими факторами измеряемых величин в выражениях (1), (2)

$$b_{ji} = \frac{\partial f_j}{\partial p_i} \frac{p_i^0}{f_j^0} = \Delta \tilde{G}_{ji} \frac{p_i^0}{f_j^0}.$$

Линеаризация оператора обратной задачи в некоторой окрестности точки в пространстве модельных параметров позволяет свести ее к решению следующей системы линейных алгебраических уравнений

$$\delta \mathbf{p} = \hat{B}^{-1} \delta \mathbf{f}.$$

Псевдообратная матрицы  $\hat{B}^{-1}$  строится на основе сингулярного разложения.

Решение обратной задачи сводится к уточнению пространственного распределения электрофизических параметров в модели с использованием результатов одномерной инверсии. Эффективность двумерной инверсии определяется скоростью решения прямых задач. В отличие от ресурсоемких сеточных методов полученные решения позволяют определять электрофизические параметры в реальном масштабе времени.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основе математического моделирования выполнен сравнительный анализ относительных амплитудно-фазовых характеристик в средах с двумерным распределением УЭП и ОДП. Расчет выполнен с использованием приближенного подхода на основе выражений (1), (2) и метода конечных разностей [Мартаков, Эпов, 1999]. Приведены диаграммы зондов электромагнитного каротажа: зонд DF05 — длина 0.5 м, частота 14 МГц; DF07 — 0.7 м, 7 МГц; DF10 — 1.0 м, 3.5 МГц; DF14 — 1.4 м, 1.75 МГц; DF20 — 2.0 м, 0.875 МГц.

Рассмотрим геоэлектрическую модель нефтесодержащего коллектора в глинистых отложениях с переменным по глубине флюидонасыщением и включающим карбонатный и глинистый слабопроницаемые прослои. Этот модельный пример отражает геоэлектрическую ситуацию, типичную для сложнопостроенных флюидонасыщенных коллекторов меловых и юрских терригенных отложений Западной Сибири. Изучаемый интервал вскрыт скважиной радиусом 0.108 м на пресном глинистом буровом растворе с УЭП 1/2 См/м и ОДП 60 отн. ед. Коллектор состоит из нефте-, нефтеводо- и водонасыщенного пластов одинаковой мощности (2 м), разделенных карбонатным и глинистым прослоями (1 м). Верхний нефтенасыщенный пласт с УЭП 1/25 См/м и ОДП 5 отн. ед. характеризуется понижающей зоной проникновения (радиус 0.3 м, УЭП 1/15 См/м, ОДП 25 отн. ед.). Средний нефтеводонасыщенный пласт (1/15 См/м, 10 отн. ед.) включает понижающую зону проникновения (0.3 м, 1/20 См/м, 25 отн. ед.) и окаймляющую зону (0.4 м, 1/5 См/м, 25 отн. ед.), сформированную оттесненной фильтратом бурового раствора пластовой водой. Нижний водонасыщенный пласт (1/5 См/м, 20 отн. ед.) характеризуется понижающей зоной проникновения (0.4 м, 1/25 См/м, 25 отн. ед.). Карбонатный прослой имеет УЭП 1/75 См/м и ОДП 2 отн. ед., глинистый прослой и вмещающие отложения — 1/3 См/м и 50 отн. ед. соответственно. На рис. 1 приведено вертикальное распределение (I) УЭП и ОДП в зонах проникновения (ЗП), окаймляющей зоне (ОЗ) и неизмененных частях пластов (П).

На рис. 2 показаны синтетические диаграммы разностей фаз и относительных амплитуд, полученных с использованием метода конечных разностей (I) и приближенного подхода (2). Наблюдается хорошее совпадение. В среднем для зондов DF05-20 относительная погрешность приближенных расчетов разностей фаз составляет от 3.9 до 6.4 %, относительных амплитуд — от 1.2 и 2.5 % соответственно. Наибольшее расхождение диаграмм разностей фаз наблюдается вблизи пересечения границ пластов и в данном примере достигает 12 %. На интервалах коллекторов относительная погрешность для зонда DF05 составляет 5.2 % и обусловлена значительным контрастом электрофизических параметров в радиальном направлении, главным образом влиянием понижающей зоной проникновения. В верхней части интервала относительная погрешность для зонда DF20 составляет 3.7 %, что связано с вертикальной неоднородностью разреза и влиянием карбонатного прослоя. Относительные погрешности приближенного моделирования диаграмм относительных амплитуд для зондов DF05-20 в среднем составляют от 1 до 4.2 %. Несоответствие диаграмм относительных амплитуд наблюдается при пересечении границ пластов, а также на интервале нижнего коллектора. Здесь относительная погрешность зонда DF05 составляет около 7 % и обусловлена большим радиальным и вертикальным контрастом электрофизических параметров. Относительная погрешность зонда DF20 не превышает 2 %.

К основным особенностям поведения диаграмм относительных амплитудно-фазовых характеристик в рассматриваемой модели можно отнести следующие. Диаграммы разностей фаз более дифференцированы и отражают выраженную вертикальную неоднородность разреза, что позволяет корректно провести его расчленение как по диаграммам коротких, так и длинных зондов. Диаграммы относительных амплитуд более сглажены в верхней части коллектора, осложненного карбонатным прослоем. Проводящий глинистый прослой хорошо выделяется по диаграммам как разностей фаз, так и относительных амплитуд. На интервалах коллекторов, характеризующихся проникновением фильтрата бурового раствора в пласт, наблюдаются выраженные кривые зондирования. Диаграммы отражают типичную геоэлектрическую ситуацию пространственно неоднородных флюидонасыщенных горных пород.

В работе [Эпов, Глинских, 2005] проведен анализ распределения интегральных вкладов (соответствующих псевдогеометрических факторов), определяющих сигналы относительных амплитудно-фазовых характеристик по УЭП и ОДП. Показано, что разность фаз является более локальной характеристикой, а относительная амплитуда обладает большей глубиной. При этом отмечается большая



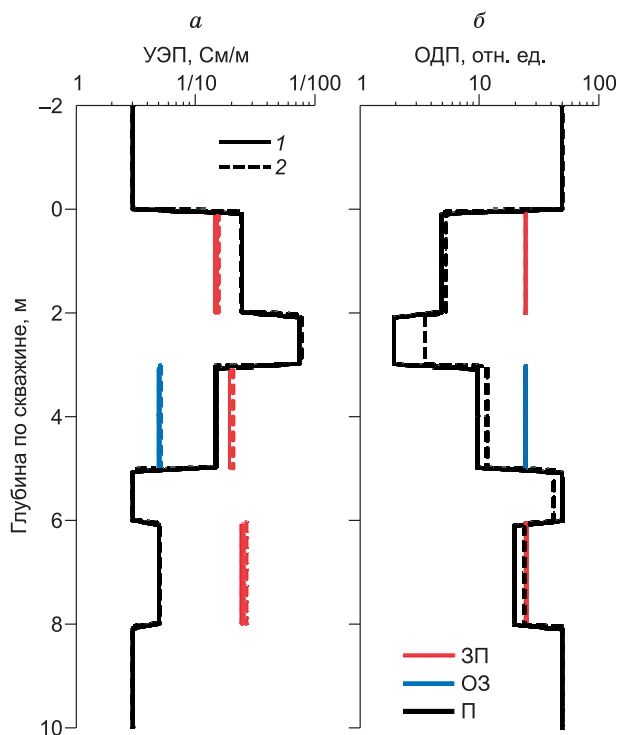


Рис. 1. Двумерное распределение электрофизических параметров в модели сложностроенного нефтеводонасыщенного коллектора.

Исходные (1) и восстановленные (2) распределения УЭП (а) и ОДП (б).

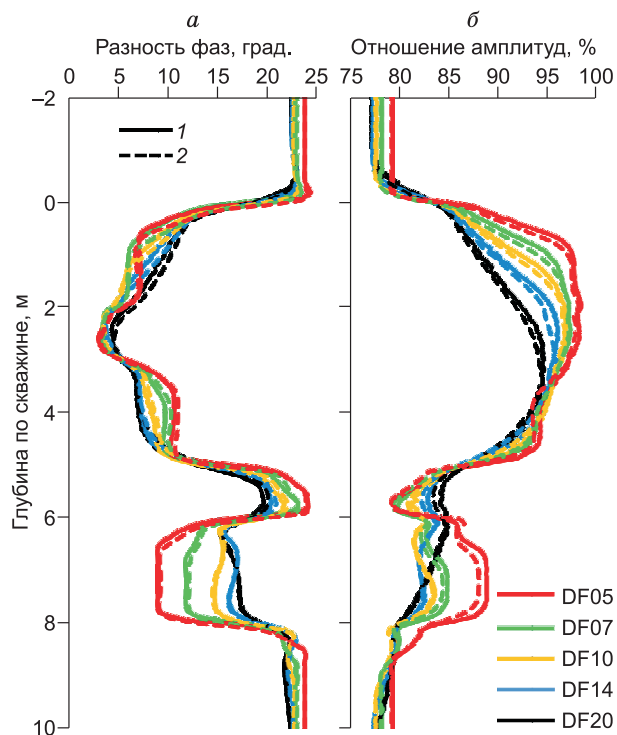
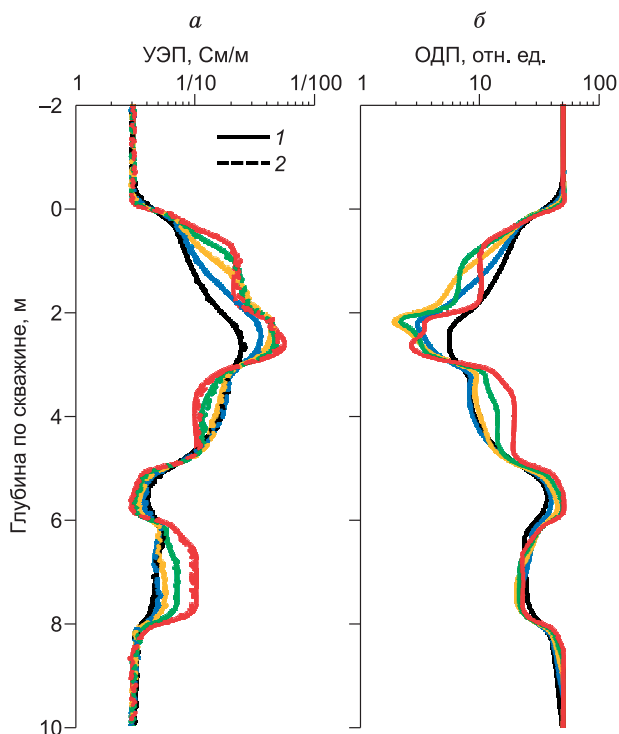


Рис. 2. Синтетические диаграммы разностей фаз (а) и относительных амплитуд (б) в модели нефтеводонасыщенного коллектора, рассчитанные с использованием конечных разностей (1) и приближенного подхода (2).

локальность и меньшая глубинность разности фаз по УЭП, чем по ОДП. Для относительной амплитуды наблюдается обратная ситуация — большая чувствительность и глубинность к УЭП, и большая локальность к ОДП. Сравнительный анализ приведенных синтетических диаграмм в «резистивной» модели коллектора показывает, что ОДП оказывает большее влияние на разности фаз, чем на относительные амплитуды коротких высокочастотных зондов. Так, в рассматриваемой модели влияние ОДП проявляется в относительном изменении разностей фаз зонда DF05 до 12 %, DF07-10 — 4—6 % и DF14-20 не более 2 %. Наблюдаемые изменения относительных амплитуд в среднем в 1.5—2 раза меньше.

Проведен анализ распределения (рис. 3, 1) электрофизических параметров фоновой модели. Диаграммы УЭП и ОДП фоновой модели, рассчитанные на основе выражений (3), (4), описывают эквивалентную однородную среду. Ее параметры зависят от распределения электрофизических параметров в двумерной модели, а также условий возбуждения. Как видно, приведенные диаграммы хорошо отражают как вертикальные, так и радиальные

Рис. 3. Диаграммы распределения УЭП (а) и ОДП (б) фоновой модели (1), трансформация относительных амплитудно-фазовых характеристик в кажущиеся (2).



неоднородности. По диаграммам УЭП и ОДП фоновой модели выделяются проницаемые интервалы пород-коллекторов, высокоомный карбонатный и проводящий глинистый прослой, а также вмещающие отложения. Электрофизические параметры фоновой модели на интервалах глинистых отложений полностью соответствуют модельным ( $1/3$  См/м, 50 отн. ед.). В карбонатных прослоях значения УЭП фоновой модели достигают  $1/60$  См/м для зонда DF05 и  $1/25$  См/м для DF20, при этом для них значения ОДП составляют 2.5 и 6 отн. ед. На интервалах флюидонасыщенных пластов значения электрофизических параметров осредняются. Так, в нефтеводонасыщенном пласте для зондов DF05-07 значения УЭП  $1/8—1/10$  См/м и ОДП 22—27 отн. ед., для зонда DF20 —  $1/18—1/20$  См/м и 8—9 отн. ед. соответственно.

Таким образом, применение предложенного подхода к выбору однородной фоновой модели позволяет использовать приближенные решения (1), (2) в широком диапазоне электрофизических параметров двумерных моделей терригенных пластов-коллекторов с относительными погрешностями моделирования, в целом не превосходящими аппаратные.

### ЧИСЛЕННАЯ ИНВЕРСИЯ

Добавление в инверсию значений относительных амплитуд обеспечивает значительное сужение области эквивалентности при определении электрофизических параметров, а также позволяет перейти к восстановлению их полного набора. Повышается достоверность определения пространственного распределения УЭП, появляется возможность оценки ОДП. Последнее делают возможным выявление ее связей как с флюидонасыщением, так и литологическим составом. Как уже указывалось, высокими значениями ОДП характеризуются глинистые интервалы, повышенными — водонасыщенные коллекторы и низкими — нефтенасыщенные.

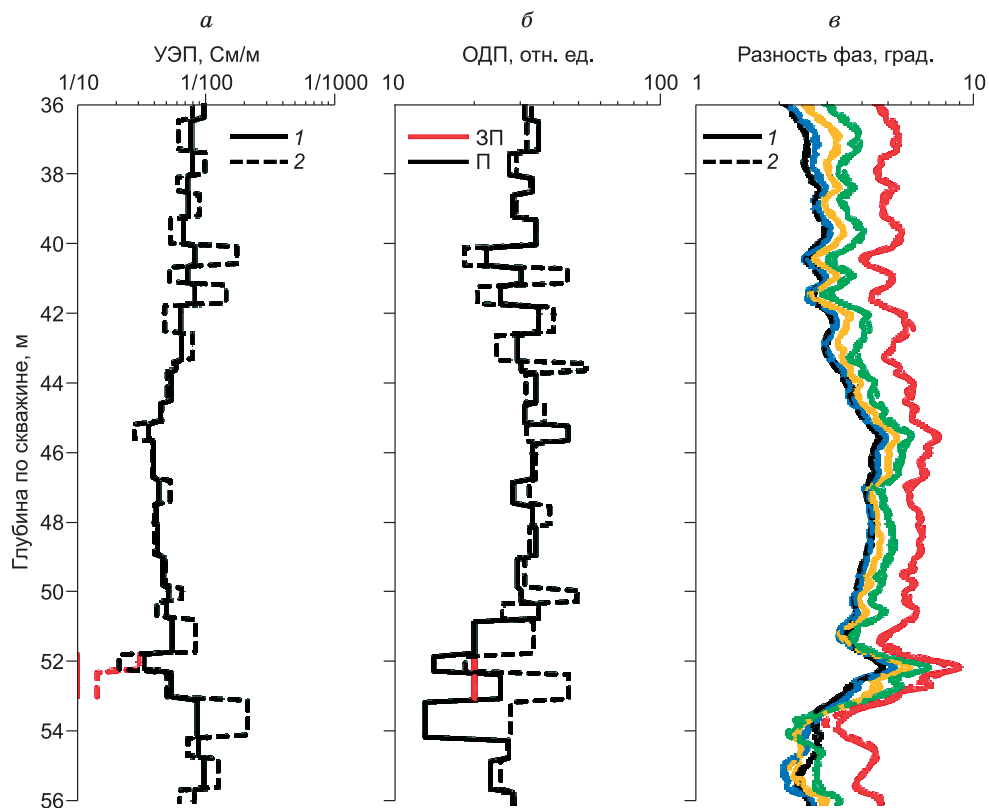
Для оценки возможностей определения ОДП на интервалах терригенных флюидонасыщенных пластов проведена численная инверсия диаграмм относительных амплитудно-фазовых измерений в моделях с двумерным распределением электрофизических параметров. Для проверки алгоритма линейной инверсии используем синтетические диаграммы, предварительно зашумленные с помощью нормально распределенных относительных погрешностей измерений с дисперсией 0.05.

Совместная двумерная инверсия разностей фаз и относительных амплитуд проведена для модели нефтеводонасыщенного коллектора, осложненного маломощными карбонатным и глинистым прослоями (см. рис. 1). В качестве стартовой используем однородную модель с параметрами вмещающих глинистых отложений ( $1/3$  См/м, 50 отн. ед.). Фоновая модель определена на основе трансформации относительных амплитудно-фазовых характеристик в кажущиеся УЭП и ОДП. Распределение кажущейся УЭП (2), полученной из зашумленных синтетических диаграмм, приведено на рис. 3, а. Как видно, диаграммы кажущихся значений и параметров фоновой модели полностью совпадают. Это подтверждает корректность использования выражений (3), (4) для выбора фоновой модели и описания пространственно неоднородной среды, эквивалентной однородной.

На рис. 1 приведены исходные (1) и восстановленные (2) вертикальные распределения УЭП и ОДП в прискважинных зонах и неизменных частях пластов. Отмечается хорошее восстановление УЭП как в прискажинной области, так и в пластах. Ее значения в нефтенасыщенном пласте составляют  $1/24.8$  См/м, нефтеводонасыщенном —  $1/14.8$  См/м и водонасыщенном —  $1/5.1$  См/м. Также значения УЭП, близкие к исходным, отмечаются в зонах проникновения. Восстановленные значения УЭП карбонатного прослоя составляют  $1/78$  См/м, а глинистого —  $1/2.9$  См/м. В целом относительная погрешность определения пространственного распределения УЭП не превышает 6 %. Менее точно находятся значения ОДП. Более достоверно определяется вертикальное распределение ОДП неизменных проникновением пластов. Значения ОДП в прискважинных зонах мало изменяются и составляют 25 отн. ед. Отмечается повышение относительной погрешности определения ОДП в более проводящих и сравнительно тонких пластах. Так, восстановленные значения ОДП нефтенасыщенного пласта составляют 5.4 отн. ед., нефтеводонасыщенного — 11.2 отн. ед. и водонасыщенного — 23.4 отн. ед. При этом в карбонатном и глинистых прослоях — 3.7 и 42.6 отн. ед. соответственно. Относительная погрешность величин ОДП может достигать до 20 %, что в проводящих и тонкослоистых разрезах делает ее оценочным параметром.

При изучении карбонатных разрезов, характеризующихся низкими значениями УЭП, становится возможной оценка ОДП пород-коллекторов и выявление ее зависимости от типа флюидонасыщения. Выполнены численные эксперименты по определению пространственного распределения электрофизических параметров по практическим данным в интервалах флюидосодержащих пластов карбонатного разреза. В качестве стартовой модели используются результаты одномерной инверсии с определением УЭП и ОДП.

На рис. 4 приведены результаты двумерной инверсии практических диаграмм высокочастотного электромагнитного каротажа в интервале карбонатного коллектора, вскрытого скважиной (0.108 м) на



**Рис. 4.** Результаты инверсии практических диаграмм высокочастотного электромагнитного каротажа в интервале карбонатного коллектора, восстановленные распределения УЭП (*а*), ОДП (*б*), диаграммы разностей фаз (*в*).

*а, б* — одно- (*1*) и двумерная (*2*) инверсия, *в* — практические (*1*) и синтетические (*2*) диаграммы.

буровом растворе на нефтяной основе (1/10 См/м). О степени детальности проведенных исследований свидетельствуют предварительно выделенные тонкие пласты. Их толщины варьируются от 0.3 до 1.1 м, что существенно меньше длины зондирующей системы. Показаны вертикальные распределения УЭП и ОДП по результатам одномерной (*1*) и двумерной (*2*) инверсий. На интервале 51.8—53.0 м выявлены пласты с повышающими зонами проникновения (толщина 0.34—0.56 м). Применение двумерной инверсии позволило уточнить пространственное распределение электрофизических параметров. Наиболее существенная их коррекция отмечается в интервалах 36.0—43.0, 51.0—56.0 м для УЭП и 40.0—46.0, 50.0—54.0 м для ОДП. В целом породы характеризуются широким диапазоном значений УЭП (1/21—1/210 См/м), а диапазон значений ОДП лежит в пределах от 16 до 52 отн. ед. В средней части изучаемого интервала значения УЭП пластов уменьшаются, а значения ОДП увеличиваются. При этом в верхней части отмечается их совместное увеличение, а в нижней — уменьшение.

Приведенный пример иллюстрирует возможности проведения детальной интерпретации на интервалах маломощных пластов с использованием двумерной инверсии. О достоверности полученных результатов можно судить по сравнительному анализу представленных практических (*1*) и рассчитанных для восстановленной модели синтетических (*2*) диаграмм разностей фаз (см. рис. 4, *в*). Наблюдается хорошее совпадение практических и синтетических диаграмм. Средние значения относительных расхождений на рассматриваемом интервале составляют 3—4 % для коротких зондов и не превышают 2 % для длинных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны эффективные программно-алгоритмические средства быстрого двумерного моделирования и инверсии данных высокочастотного электромагнитного каротажа с целью реконструкции пространственного распределения УЭП и ОДП терригенных и карбонатных пород.



Решение прямой задачи основано на линеаризованных представлениях относительных амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля в двумерных проводящих средах с учетом токов смещения. Проведено математическое моделирование и сравнительный анализ диаграмм электромагнитного каротажа на основе приближенного подхода и метода конечных разностей. Для повышения точности моделирования предложен способ выбора фоновой модели. Он основан на анализе распределения вихревых токов в областях возмущения электрофизических параметров. Его результаты используются для описания пространственно неоднородной среды, эквивалентной однородной. При таком подходе возможно численное моделирование с приемлемой для практического применения точностью в широком диапазоне электрофизических параметров.

Решение обратной задачи электромагнитного каротажа включает псевдообращение матрицы чувствительностей относительных амплитудно-фазовых характеристик. Совместная двумерная инверсия разностей фаз и относительных амплитуд позволяет повысить достоверность определения пространственного распределения УЭП и сделать оценки ОДП. Проведенные численные эксперименты по восстановлению электрофизических параметров на синтетических и практических данных электромагнитного каротажа указывают на возможности определения ОДП на интервалах флюидонасыщенных пластов терригенных и карбонатных разрезов.

Разработанные программно-алгоритмические средства численного моделирования и количественной интерпретации обладают приемлемой точностью, а оперативность вычислений делает возможным их применение для интерпретации экспериментальных данных в реальном масштабе времени.

## ЛИТЕРАТУРА

- Аксельрод С.М.** К измерению диэлектрической проницаемости горных пород в условиях скважины // Прикладная геофизика, 1968, вып. 52.
- Аксельрод С.М.** Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник, 2007, вып. 10, с. 103—126.
- Аксельрод С.М.** Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник, 2012, вып. 4, с. 78—112.
- Брылкин Ю.Л., Дубман Л.И.** О диэлектрической проницаемости горных пород осадочного происхождения // Геология и геофизика, 1972 (1), с. 117—121.
- Брылкин Ю.Л., Дубман Л.И.** О диэлектрической проницаемости влажных песчаных пород // Электромагнитные методы исследования скважин. Новосибирск, Наука, 1979, с. 233—242.
- Даев Д.С., Денисов С.Б.** О высокочастотном индукционном каротаже // Разведочная геофизика. М., Недра, 1970, вып. 42, с. 106—123.
- Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А.** Петрофизическая интерпретация повторных электромагнитных зондирований в скважинах // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 852—861.
- Кауфман А.А., Антонов Ю.Н.** Диэлектрический индуктивный каротаж. Новосибирск, Наука, 1971, 140 с.
- Мартаков С.В., Эпов М.И.** Прямые двумерные задачи электромагнитного каротажа // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (2), с. 249—254.
- Могилатов В.С.** Вторичные источники и линеаризация в задачах геоэлектрики // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (7), с. 1102—1108.
- Технология** исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 2000, 121 с.
- Эпов М.И., Глинских В.Н.** Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия // Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2005, 98 с.
- 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.
- Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Сухорукова К.В., Петров А.Н., Соболев А.Ю., Власов А.А.** Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть, 2010, № 2, с. 16—19.
- 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.

**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.

**Anderson B.I., Barber T.D., Luling M.D., Sen P.N.** Observation of large dielectric effects on induction logs, or, can source rocks be detected with induction measurements // SPWLA 47th Annual Logging Symposium. (Veracruz, Mexico, June 4—7, 2006). 2006, v. 47, CD-ROM, paper OOO.

**Anderson B.I., Barber T.D., Luling M.G., Rasmus J., Sen P.N., Tabanou J.R., Haugland M.** Observations of large dielectric effects on LWD propagation-resistivity logs // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. (Austin, Texas, June 3—6, 2007). 2007, v. 48, CD-ROM, paper BB.

**Anderson B.I., Barber T.D., Luling M.D., Sen P.N., Taherian R., Klein J.** Identifying potential gas-producing shales from large dielectric permittivities measured by induction quadrature signals // SPWLA 49th Annual Logging Symposium. (Edinburgh, Scotland, May 25—28, 2008). 2008, v. 49, CD-ROM, paper HHHH.

**Bittar M., Li J., Kainer G., Cherry R., Torres D, Mc Coy D.** A modern microwave formation evaluation sensor and its applications in reservoir evaluation // SPWLA 51st Annual Logging Symposium. (Perth, Australia, June 19—23, 2010). 2010, v. 51, CD-ROM, paper B.

**Cheryuka A.B., Martakov S.V., Epov M.I.** High-frequency induction sounding method for fracture modeling and imaging // Proc. 4th SEGJ Intern. Symposium, Tokyo, 1998, p. 205—210.

**Seleznev N.V., Habashy T.M., Boyd A.J., Hizem M.** Formation properties derived from a multi-frequency dielectric measurement // SPWLA 47th Annual Logging Symposium. (Veracruz, Mexico, June 4—7, 2006). 2006, v. 47, CD-ROM, paper VVV.

**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 // SPWLA 50th Annual Logging Symposium. (Woodlands, Texas, June 21—24, 2009). 2009, v. 50, CD-ROM, paper RRR.

**Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N.** Improving petrophysical interpretation with wide-band electromagnetic measurements // SPE J., 2008, v. 13, № 2, p. 205—215.

**Zhdanov M.S.** Geophysical electromagnetic theory and methods. Amsterdam, New York, Tokyo, Elsevier, 2009, 848 p.

*Рекомендована к печати 21 февраля 2013 г.  
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию  
21 января 2013 г.*