

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.832

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА
ПРИ ОПИСАНИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОНКОСЛОИСТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
НЕПРЕРЫВНЫМИ ФУНКЦИЯМИ**

В.Н. Глинских, М.И. Эпов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Предложен подход к описанию пространственного распределения электропроводности тонкослоистых коллекторов непрерывными функциями. На его основе создан алгоритм приближенного двумерного численного моделирования диаграмм электромагнитного каротажа в средах, характеризующихся тонким переслаиванием песчаных и глинистых прослоев различной мощности, причем первые могут включать развитую зону проникновения сложного строения. Проведен сравнительный анализ синтетических диаграмм электромагнитного каротажа при описании вертикального распределения электропроводности кусочно-постоянными и непрерывными периодическими функциями. Показано, что использование непрерывных функций позволяет воспроизводить сигналы с относительной погрешностью, не превышающей 5%. Для более точной аппроксимации кусочно-постоянной функции непрерывной предложено учитывать усредненную электропроводность тонкослоистой среды.

Тонкослоистый коллектор, численное моделирование, высокочастотные электромагнитные зондирования, электропроводность, непрерывные функции.

**CONDUCTIVITY OF LAYERED RESERVOIRS IN INDUCTION DATA PROCESSING:
CONTINUOUS-FUNCTION APPROXIMATION**

V.N. Glinskikh and M.I. Epov

We suggest to approximate the depth-dependent conductivity of layered formations by continuous functions and use this approach to design an algorithm for 2D inversion of induction logging data. The logs represent formations consisting of alternating thin clay and sand layers of varying thickness, in which the sand layers can involve a developed invaded zone of a complex structure. Comparison of synthetic logs in models with piecewise constant and continuous approximations of conductivity shows that the continuous-function approximation is accurate within 5%, and the accuracy improves as the average conductivity of the layered formation is taken into account.

Layered formation, numerical modeling, high-frequency induction sounding, electrical conductivity, continuous function

ВВЕДЕНИЕ

Вовлечение в изучение и разработку новых типов нефтегазовых залежей приводит к расширению круга задач промысловой геофизики. Одна из них связана с нефтенасыщенными коллекторами, представленными тонким переслаиванием песчано-глинистых пропластков. При визуальном изучении керна из интервалов этих коллекторов можно наблюдать чередование песчаных и глинистых прослоев не только в сантиметровом, но и метровом масштабах.

Одной из основных физических характеристик терригенных пород, по которой определяется тип флюидонасыщения, является их электропроводность или удельное электрическое сопротивление. Даже при относительно небольшой (~5—10 г/л) минерализации пластовых вод электропроводность нефтенасыщенного коллектора будет ниже, чем водонасыщенного. Столь однозначная связь в реальных условиях соблюдается не всегда, поскольку наличие хорошо проводящих глинистых частиц или их скоплений в терригенных породах приводит к увеличению их средней электропроводности. Наиболее ярко этот эффект проявляется в уже упомянутых коллекторах, представленных субгоризонтальным чередованием

тонких прослоев глин и флюидонасыщенных песчаников. Традиционно информация об электропроводности извлекается из измерений на постоянном (БКЗ) и переменном (ИК, ВИКИЗ) токах. В работе С.М. Рытова [1955] было показано, что электрическое и электромагнитные поля в такой среде эквивалентны их значениям в однородной макроанизотропной среде при условии, что расстояние между источником и точкой измерения существенно (примерно в шесть и более раз) превосходит характерную мощность прослоев. В широко используемых каротажных зондах минимальное расстояние между источником и приемником составляет 0.5 м. В этом случае при толщине прослоев меньшее чем 0.07 м модель тонкослоистого коллектора хорошо описывается однородной макроанизотропной средой. Последняя является трансверсально-изотропной, т.е. ее электропроводности в горизонтальной плоскости σ_h и вертикальном

направлении σ_v различаются между собой. При этом $\sigma_h = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$, $\sigma_v = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\sigma_i}}$ (здесь и далее n — чис-

ло прослоев). В силу известного парадокса анизотропии [Альпин, 1978; Альпин, Великин, 1983] сигнал, измеренный в зондах постоянного тока (БКЗ), определяется только горизонтальным удельным электрическим сопротивлением и практически не зависит от вертикального. Аналогично в индукционных и электромагнитных зондах. При субвертикальном пересечении скважиной тонкослоистого коллектора измеренный индукционный сигнал зависит только от горизонтальной электропроводности. Таким образом, полученные при стандартной интерпретации диаграмм в тонкослоистых коллекторах значения электропроводности будут сильно занижены по сравнению со значениями в нефтенасыщенных прослоях. Эти данные, если считать пласт однородным, соответствуют водонасыщенным песчаникам, тогда как реальный тонкослоистый коллектор может содержать значительное число нефтенасыщенных песчаных прослоев.

Решение задачи определения параметров отдельных прослоев тонкослоистого коллектора в общей постановке не представляется возможным в основном в силу их большого числа и относительно малой мощности. Поэтому разделение по типу флюидонасыщения проводят, определяя значения горизонтальной и вертикальной электропроводности или коэффициент электрической макроанизотропии $\Lambda^2 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ [Табаровский и др., 1976; Табаровский, Эпов, 1982]. Значения последнего, превышающие единицу, будут указывать на наличие в коллекторе тонких глинистых прослоев.

Традиционно задачу определения параметров макроанизотропного коллектора решают, применяя многокомпонентные зонды, где генерация токов и измерения ЭДС выполняются в ортогональных катушках [Табаровский и др., 1976; Wang et al., 2003; Zhang et al., 2004]. Необходимость использования таких специальных систем, а также применения соответствующих ресурсоемких вычислительных схем и процедур интерпретации заметно снижает эффективность их применения. Отметим, что задача геологической интерпретации этих результатов, а главным образом соотношения параметров макроанизотропии и тонкослоистой среды, до сих пор не решена в сколько-нибудь полном виде.

Зависимости электропроводности от глубины для таких коллекторов описываются с помощью кусочно-постоянных функций. В этом случае каждому из прослоев соотносят два параметра — его электропроводность и мощность, общее число параметров для коллектора может составлять многие десятки. В реальных терригенных коллекторах вблизи границ прослоев разного литологического и гранулярного составов наблюдается постепенное замещение одних пород другими, что связано с непрерывностью процесса осадконакопления. В силу данного обстоятельства целесообразно рассматривать распределение электропроводности тонкослоистого коллектора с глубиной не с помощью кусочно-постоянных, а непрерывных функций. С практической точки зрения тонкослоистый коллектор, описываемый большим числом геоэлектрических параметров, может быть охарактеризован средними значениями, к которым можно отнести осредненные эффективные мощности \bar{h}_1 , \bar{h}_2 и электропроводности $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ песчаных и глинистых прослоев. Таким образом, многопараметрическое описание тонкослоистого коллектора можно редуцировать к 4 средним параметрам $\{\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2\}$. Представим распределение электропроводности тонкослоистых коллекторов в вертикальном направлении, используя непрерывные периодические функции. Такой подход позволит свести задачу инверсии к определению средних параметров песчаных и глинистых прослоев без введения макроанизотропной модели и применения многокомпонентных индукционных систем.

Рассмотрим решение этой задачи в рамках интенсивно развивающейся модификации индукционного каротажа — высокочастотного (0.8—14 МГц) электромагнитного каротажа (ВИКИЗ) с измерением относительных характеристик (разности фаз и относительной амплитуды) [Даев, 1974; Антонов, 1980; Технология..., 2000; Эпов, Глинских, 2005]. Выбор этого метода во многом обусловлен его высоким пространственным разрешением [Эпов, Глинских, 2005].

Опыт развития интерпретационных систем для индукционного каротажа показал высокую эффективность приближенных подходов для решения как прямых, так и обратных задач [Долль, 1957; Кауфман, 1965; Плюснин, 1968]. В основе этого подхода лежит алгоритм приближенного моделирования сигналов индукционного каротажа в осесимметрических средах. Он основан на представлении электромагнитного поля в виде обобщенного ряда Неймана [Хисамутдинов, Табаровский, 1977; Владимиров, 1988; Nabashy et al., 1993]. Такой подход был реализован как для сред с кусочно-постоянным, так и непрерывным пространственным распределением электропроводности [Эпов, Глинских, 2005]. В работе [Эпов, Глинских, 2006] предложен алгоритм инверсии диаграмм электромагнитного каротажа при описании распределения электропроводности среды в радиальном направлении с помощью кубических сплайнов.

Развитие предложенного подхода к описанию пространственного распределения электропроводности тонкослоистых коллекторов непрерывными периодическими функциями позволило создать эффективный алгоритм двумерного моделирования диаграмм электромагнитного каротажа для терригенных коллекторов, характеризующихся чередованием песчаных и глинистых прослоев различной мощности (до десятков сантиметров). При этом песчаные прослои могут, в свою очередь, включать зону проникновения сложного строения.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В ТОНКОСЛОИСТОЙ СРЕДЕ

Рассмотрим осесимметричную модель тонкослоистого коллектора, включающую пачку чередующихся прослоев с плоскопараллельными горизонтальными границами, пересеченную вертикальной скважиной кругового сечения. Предположим, что в интервале коллектора мощности прослоев постоянны. Часть из них может содержать зону проникновения и/или окаймляющую зону. Последние отделены друг от друга коаксиально-цилиндрическими границами.

Введем цилиндрическую систему координат $\{r, \varphi, z\}$, ось z которой совпадает с осями симметрии и скважины и направлена вниз. Учитывая периодичность структуры коллектора удобно ввести нумерацию прослоев $j = 1, 2$. Уравнения плоских границ имеют вид $z = z_k$, где $k = 1, \dots, n-1$. Координаты границ прослоев могут быть выражены через их мощности $z_k = z_{k-1} + h_j$, h_j — мощности прослоев соответственно. В силу периодичности структуры среды уравнение l -й цилиндрической границы в j -м прослое имеет вид $r = r_{jl}$, $l = 1, \dots, m$, где m — число радиальных зон. Как правило, границы $r = r_{j1}$ — «скважина—зона проникновения», $r = r_{j2}$ — «зона проникновения—окаймляющая зона», $r = r_{j3}$ — «прискважинная область—пласт». При отсутствии цилиндрических границ $l = 0$. В дальнейшем для упрощения записи этот индекс будет опущен.

При описании электропроводности тонкослоистого коллектора кусочно-постоянной функцией области, образованные вертикальными и горизонтальными границами, характеризуются своими значениями электропроводности σ_{jl} (или сопротивления $\rho_{jl} = \frac{1}{\sigma_{jl}}$), т.е.

$$\sigma^{\text{const}}(z) = \sigma_{jl}. \quad (1)$$

Для непрерывного описания вертикального распределения электропроводности тонкослоистого коллектора можно использовать периодическую функцию $f(z) = \sin(z)$. Тогда электропроводность в вертикальном направлении на интервале прослоя запишем следующим образом

$$\sigma^{\text{func}}(z) = \sigma_{jl} = \bar{\sigma}_l + \Delta\sigma_{jl} \sin\left(\frac{\pi}{h_j}(z - z_k)\right). \quad (2)$$

Здесь $\bar{\sigma}_l = \frac{\sum_j \sigma_{jl} h_j}{\sum_j h_j}$ определим как усредненные значения электропроводности пачки чередующихся

прослоев, слагающих тонкослоистый коллектор. Будем считать, что в радиальном направлении значение электропроводности характеризуется кусочно-постоянной функцией, поэтому для удобства функциональное описание по этой координате опустим. В вертикальном направлении непрерывная периодическая функция электропроводности $\sigma^{\text{func}}(z)$ аппроксимирует кусочно-постоянное представление $\sigma^{\text{const}}(z)$, определенных выражениями (2) и (1) соответственно. При этом максимальные значения электропроводностей в прослоях $\sigma^{\text{const}}(\tilde{z}) = \sigma^{\text{func}}(\tilde{z}) = \sigma_{jl}$, где $\tilde{z} = \frac{z_k + z_{k+1}}{2}$. На границах всех прослоев $\sigma(z_k) = \bar{\sigma}_l$.

Распределения электропроводности тонкослоистого коллектора при описании функциями $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma^{\text{func}}(z)$ приведены на рис. 1. Непрерывная периодическая функция аппроксимирует исходную кусочно-постоянную в соответствии с (2).

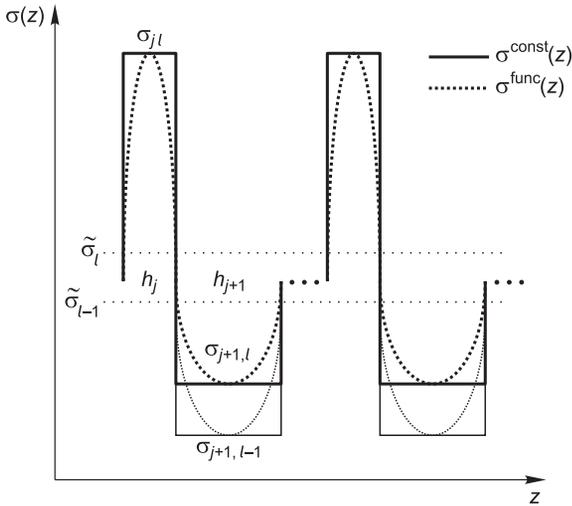


Рис. 1. Параметризация электропроводности тонкослоистого коллектора по глубине, описанной кусочно-постоянной, непрерывной функциями.

Будем считать, что электропроводность бурового раствора и радиус скважины для определенности постоянны и равны σ_C и r_C . В дальнейшем во всех расчетах примем $\sigma_C = 1/2$ См/м, $r_C = 0.1$ м. Будем считать, что среда немагнитная (магнитная проницаемость $\mu_{jl} = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м) и это условие выполняется для подавляющего большинства терригенных отложений.

КРАЕВАЯ ЗАДАЧА

Для решения прямой задачи электромагнитного каротажа в двумерных проводящих средах используем приближенный подход, основанный на методе возмущений [Nabashy et al., 1993; Эпов, Глинских, 2005]. Основная его идея состоит в представлении двумерного распределения электропроводности и электрического поля, возбуждаемого индуктивным источником, в виде суммы $\sigma(r, z) = \sigma^b(p) + \delta\sigma(r, z)$ и $\mathbf{E} = \mathbf{E}^b + \delta\mathbf{E}$, где $\sigma^b(p)$ и \mathbf{E}^b — одномерное распределение электропроводности и электрическое поле в фоновой среде, $\delta\sigma(r, z)$ — относительно малые возмущения $\sigma^b(p)$, приводящие к изменению электрического поля. Отметим, что σ^b зависит только от одной из пространственной координат ($\sigma^b(r)$, $\sigma^b(z)$, $\sigma^b = \sigma_0$).

Система квазистационарных уравнений Максвелла в проводящей немагнитной среде может быть сведена к уравнению Гельмгольца для электрического поля $\mathbf{E}(r, z)$ в области, содержащей сторонний индуктивный источник

$$\text{rotrot } \mathbf{E} + k^2(r, z)\mathbf{E} = -i\omega\mu_0 \mathbf{j}^{\text{ст}}. \quad (3)$$

Здесь $k^2(r, z) = -i\omega\mu_0\sigma(r, z)$, i — мнимая единица, ω — круговая частота, $\mathbf{j}^{\text{ст}}$ — плотность сторонних токов.

Отметим, что плотность стороннего тока в генераторной катушке, расположенной на оси скважины, содержит только одну ненулевую компоненту $\mathbf{j}^{\text{ст}} = \{0, j_{\varphi}^{\text{ст}}, 0\}$. В силу симметрии среды и источника вектор напряженности электрического поля также содержит только одну ненулевую компоненту — тангенциальную $\mathbf{E} = \{0, E_{\varphi}, 0\}$. Таким образом, векторную задачу заменяем скалярной относительно тангенциальной компоненты электрического поля.

Уравнение (3) вместе с известными граничными условиями, включая условие излучения на бесконечности, определяет краевую задачу для электрического поля.

Учитывая двумерное распределение электропроводности и разложение электрического поля, приведенные выше, и уравнение (3) получим

$$\text{rotrot} (E_{\varphi}^b + \delta E_{\varphi}) + ((k^b)^2(r, z) + \delta k^2(r, z)) (E_{\varphi}^b + \delta E_{\varphi}) = -i\omega\mu_0 j_{\varphi}^{\text{ст}}, \quad (4)$$

где $\delta k^2(r, z)$ — возмущение квадрата волнового числа, связанное с относительно небольшими пространственными вариациями электропроводности в некоторой области V .

Из (4) можно получить уравнение на возмущенную составляющую δE_{φ} , решение которого методом функций Грина имеет следующий вид

$$\delta E_{\varphi} = -2\pi \int_S \delta k^2(r, z) G_{\varphi}^b(E_{\varphi}^b + \delta E_{\varphi}) dS.$$

Здесь осевая симметрия приводит к двумерному интегрированию по сечению S в плоскости $\varphi = \text{const}$.

В случае, если источник и приемник находятся вне области возмущений электропроводности, то электрическое поле $E_{\varphi}(r_0, z_0 | r, z)$ является решением интегрального уравнения Фредгольма

$$E_{\varphi}(r_0, z_0 | r, z) = E_{\varphi}^b(r_0, z_0 | r, z) - 2\pi \int_S \delta k^2(r', z') G_{\varphi}^E(r', z' | r, z) E_{\varphi}(r_0, z_0 | r', z') dS,$$

здесь (r_0, z_0) , (r, z) и (r', z') — координаты генераторной и приемной катушек и точки интегрирования по S .

Магнитное поле и соответствующая функция Грина определяется исходя из этого уравнения и $\mathbf{H} = \frac{1}{i\omega\mu_0} \text{rot } \mathbf{E}$, $\mathbf{G}^H = \frac{1}{i\omega\mu_0} \text{rot } \mathbf{G}^E$, что приводит к решению аналогичного интегрального уравнения.

В работах [Эпов, Глинских, 2003, 2005] приведены приближенные выражения для тангенциальной компоненты электрического и вертикальной компоненты магнитного полей. Здесь же анализируется точность линейного представления, эффективные приемы ее улучшения, выбор фоновой модели и др. В качестве фонового используем электромагнитное поле горизонтального витка с единичным током в двухслойной цилиндрической среде [Табаровский, 1975].

Заметим, что при описании электропроводности тонкослоистого коллектора с помощью (2) возмущение квадрата волнового числа $\delta k^2(r, z)$ также будет представлено двумя слагаемыми. Поэтому решение будет включать два интегральных слагаемых, причем второе из них содержит периодическую функцию в качестве множителя.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Типичные геоэлектрические модели тонкослоистого коллектора характеризуются наличием вертикальной скважины, пересекающей пачку горизонтальных чередующихся прослоев. Предложенный алгоритм предназначен для расчетов диаграмм электромагнитного каротажа в моделях с произвольным числом чередующихся прослоев и составной структурой прискважинной зоны. Параметры выбранных для анализа геоэлектрических моделей характерны для терригенных тонкослоистых коллекторов Западной Сибири.

Для тестирования алгоритма и определения пределов его применимости проведено численное моделирование, выполнен сравнительный анализ диаграмм электромагнитного каротажа в тонкослоистых моделях при описании распределения электропроводности в вертикальном направлении кусочно-постоянной $\sigma^{\text{const}}(z)$ и непрерывной $\sigma^{\text{func}}(z)$ функциями. Значения кажущейся электропроводности σ_k рассчитаны для пяти зондов высокочастотного электромагнитного каротажа ВИКИЗ (IK05 — длина 0.5 м, частота 14 МГц; IK07 — 0.7 м, 7 МГц; IK10 — 1.0 м, 3.5 МГц; IK14 — 1.4 м, 1.75 МГц; IK20 — 2.0 м, 875 кГц).

Рассмотрим модель тонкослоистого коллектора, представленную пачкой чередующихся песчанитых и глинистых прослоев, имеющих равные мощности $h_j = h_0$. При этом в качестве фоновой выбрана усредненная электропроводность прослоев $\sigma^b(p) = \bar{\sigma}_j$. Такой подход приводит к относительно небольшим пространственным вариациям электропроводности, которые описываются в соответствии со вторым слагаемым в выражении (2). В этом случае оно принимает вид

$$\sigma_{jl} = \sigma^b(p) + \Delta\sigma_l \sin\left(\frac{\pi}{h_0}(z - z_k)\right). \quad (5)$$

Для упрощения опустим индекс прослоев, считая, что для глинистых прослоев $j = 1$, а песчанитых — 2. Выберем прослой равной мощности $h_0 = 0.25$ м, которые характеризуются значениями электропроводности $\sigma_{11} = 1/4$ См/м, $\sigma_{21} = 1/12$ См/м соответственно и образуют коллектор общей мощностью $H = 3$ м. Распределения электропроводности по глубине при описании функциями $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma^{\text{func}}(z)$ приведены на рис. 2. Последняя аппроксимирует кусочно-постоянное распределение в соответствии с выражением (5). Здесь и далее в качестве фоновой используем двухслойную цилиндрическую модель с электропроводностью вмещающей среды $\sigma^b = 1/6$ См/м.

На рис. 3 представлены синтетические диаграммы кажущейся электропроводности σ_k в моделях $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma^{\text{func}}(z)$. Все диаграммы носят пери-

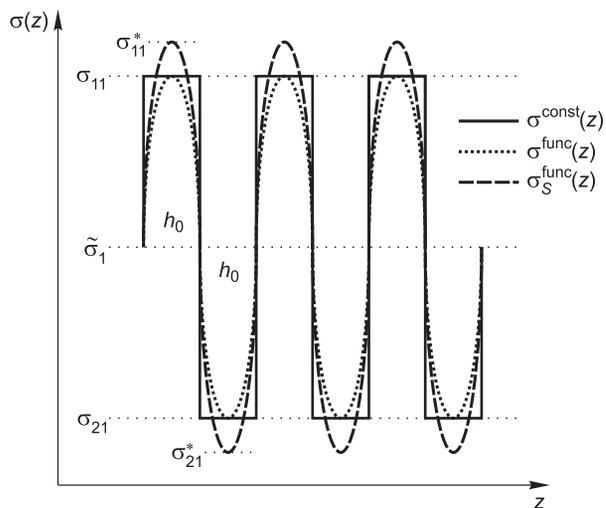


Рис. 2. Кусочно-постоянное и непрерывное распределения электропроводности тонкослоистого коллектора, представленного прослоями одинаковой мощности.

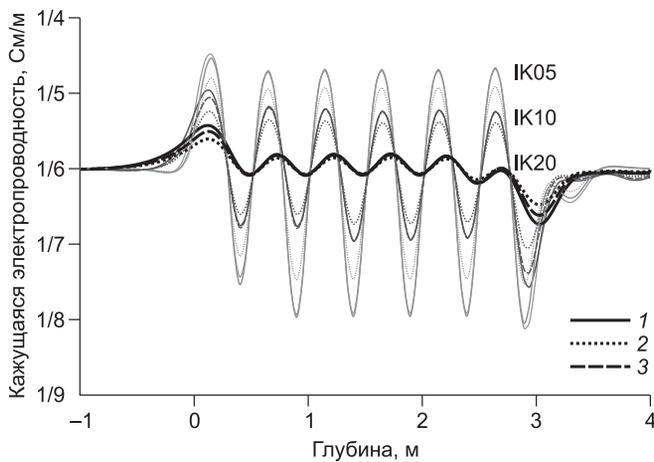


Рис. 3. Синтетические диаграммы при описании электропроводности кусочно-постоянной (1), непрерывной (2) функциями, непрерывной с учетом интегральной электропроводности (3).

около $1/8.0$ См/м, при этом в глинистых — $1/4.7$ См/м. Диаграмма зонда IK10 имеет более слабую дифференциацию: значения σ_k около $1/7.0$ и $1/5.2$ См/м соответственно. Для диаграммы зонда IK20 характерны небольшая изменчивость и близкие к усредненным величинам σ_k . С уменьшением мощности прослоев на диаграммах наблюдается уменьшение значений σ_k . Отмечаемые изменения не превышают уровень погрешности измерений при мощностях прослоев, существенно меньших базы каротажных зондов. Сравнительный анализ диаграмм в интервале коллектора показывает, что относительная погрешность численного моделирования $\delta\sigma_k$ при аппроксимации кусочно-постоянной функции электропроводности непрерывной для зонда IK05 составляет около 6 %, для IK10 — 3 %, а для IK20 — не превышает 1.5 %. При этом в области кровли и подошвы тонкослоистого коллектора наблюдается увеличение $\delta\sigma_k$ в среднем в 2—3 раза. Это обусловлено тем, что функция электропроводности терпит разрыв и существенно возрастает влияние краевых эффектов.

Обращая внимание на отличие диаграмм, рассчитанных для моделей $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma^{\text{func}}(z)$, можно сделать вывод о том, что предложенные уравнения (2) и (5) не всегда позволяют с достаточной точностью воспроизводить диаграммы. Для преодоления этого введем новый элемент в аппроксимацию функции электропроводности. Учтем дополнительное условие, заключающееся в равенстве интегральной электропроводности для кусочно-постоянной и непрерывной функций. В интервале прослоя это условие формулируется следующим образом

$$\int_0^h \sigma dz = \int_0^h \sigma^* \sin\left(\frac{\pi}{h} z\right) dz, \quad (6)$$

где h — мощность прослоя, σ — значение электропроводности пласта при описании кусочно-постоянной функцией, σ^* — экстремальное значение электропроводности (см. рис. 2).

На рис. 3 показаны синтетические диаграммы σ_k в модели с распределением электропроводности, описываемым непрерывной периодической функцией с учетом условия (6) — $\sigma_S^{\text{func}}(z)$. Как видно, эта коррекция алгоритма приводит к существенному уменьшению относительной погрешности численного моделирования. Так, на интервале коллектора значения $\delta\sigma_k$ для всех зондов не превышают 0.5 %. Наибольшие относительные погрешности наблюдаются вблизи кровли и подошвы коллектора и составляют 1—3 %. В дальнейшем при анализе диаграмм зондов в моделях с описанием электропроводности непрерывными функциями будем использовать условие (6).

Безусловно, тонкослоистый пласт, состоящий из равных по мощности песчаных и глинистых прослоев, можно отнести к сильно идеализированным моделям реальных коллекторов. Поэтому проведем сравнительный анализ каротажных диаграмм в тонкослоистых моделях при чередовании прослоев

Рис. 4. Кусочно-постоянное и непрерывное распределения электропроводности тонкослоистого коллектора, представленного прослоями разной мощности.

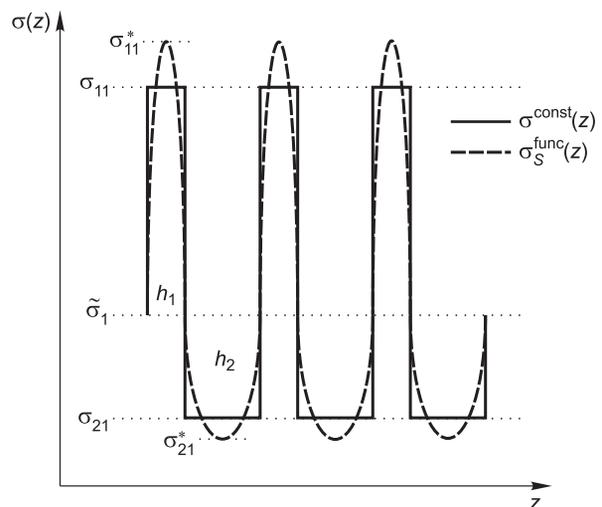


Рис. 5. Синтетические диаграммы при описании электропроводности кусочно-постоянной (1), непрерывной (2) функциями.

разной мощности, как представляющих больший практический интерес. Рассмотрим модель, в которой мощность глинистых прослоев $h_1 = 0.1$ м, а песчаных — $h_2 = 0.4$ м. Значения электропроводности были приведены выше. Отметим, что значение фоновой электропроводности $\sigma^b = 1/6$ См/м не совпадает со средней электропроводностью коллектора $\bar{\sigma}_1$. Распределения электропроводности по глубине при описании функциями $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma_S^{\text{func}}(z)$ представлены на рис. 4.

На рис. 5 приведены синтетические диаграммы кажущейся электропроводности σ_k в моделях $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma_S^{\text{func}}(z)$. Тонкое переслаивание полностью отражается на каротажных диаграммах. Значения σ_k для зонда ИК20 близки к усредненной электропроводности $\bar{\sigma}_1 = 1/8$ См/м. Так же, как и в предыдущей модели, наибольшие дифференциация и отношение экстремальных значений характерны для диаграмм коротких зондов. Например, в интервалах песчаных прослоев значения σ_k для зонда ИК05 составляют около $1/9.7$ См/м, в глинистых — $1/6.8$ См/м. При этом описание электропроводности с помощью непрерывных функций дает низкие относительные погрешности $\delta\sigma_k$. На всем интервале коллектора они не превышают 1%. Вблизи его кровли и подошвы относительные погрешности возрастают до 1—3%.

Проведем численный анализ диаграмм электромагнитного каротажа в моделях, когда мощности прослоев существенно разные, например, соизмеримые с длинами каротажных зондов. Рассмотрим модель, в которой мощность песчаных прослоев много больше глинистых и составляет $h_2 = 0.9$ м. Остальные геоэлектрические параметры модели идентичны приведенным ранее. Распределения электропроводности при описании функциями $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma_S^{\text{func}}(z)$ показаны на рис. 4.

На рис. 6 приведены синтетические диаграммы кажущейся электропроводности σ_k в моделях $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma_S^{\text{func}}(z)$. Как видно, при существенно разных мощностях прослоев диаграммы, полученные для двух моделей, очень близки. В песчаных прослоях значения σ_k для зонда ИК05 составляют около $1/10.9$ См/м, в глинистых — $1/7.0$ См/м, для ИК10 — $1/10.4$ и $1/7.7$ См/м, для ИК20 — $1/9.4$ и $1/8.0$ См/м соответственно. Относительные погрешности численного моделирования при аппроксимации непрерывной функцией в интервале коллектора в среднем составляют для зонда ИК05 около 2%, для ИК10 — 1.2% и для ИК20 — не более 0.7%. Таким образом, использование непрерывных функций для описания электропроводностей пластов может успешно применяться в моделях с периодической структурой и представляет отдельный интерес в решении более широкого круга задач каротажа.

Итак, рассмотрим геоэлектрическую модель нефтенасыщенного тонкослоистого коллектора, представленного тонкими песчанистыми и глинистыми прослоями, мощность которых меньше базы каротажных зондов. Глинистые прослои имеют мощность существенно меньше базы каротажных зондов $h_1 = 0.025$ м, их электропроводность составляет $\sigma_{11} = 1/2$ См/м. Песчаные прослои мощностью $h_2 = 0.225$ м с электропроводностью $\sigma_{23} = 1/8$ См/м содержат развитую зону проникновения. Последняя включает промытую и окаймляющую зоны с параметрами: электропроводность $\sigma_{21} = 1/30$ См/м, радиус 0.3 м и $\sigma_{22} = 1/4$ См/м, 0.5 м соответственно. Распределения электропроводности по глубине при описании функциями $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma_S^{\text{func}}(z)$ приведены на рис. 7.

На рис. 8 представлены синтетические диаграммы кажущейся электропроводности σ_k в моделях $\sigma^{\text{const}}(z)$ и $\sigma_S^{\text{func}}(z)$. Диаграммы отражают тонкослоистое строение коллектора, однако степень их дифференциации и пе-

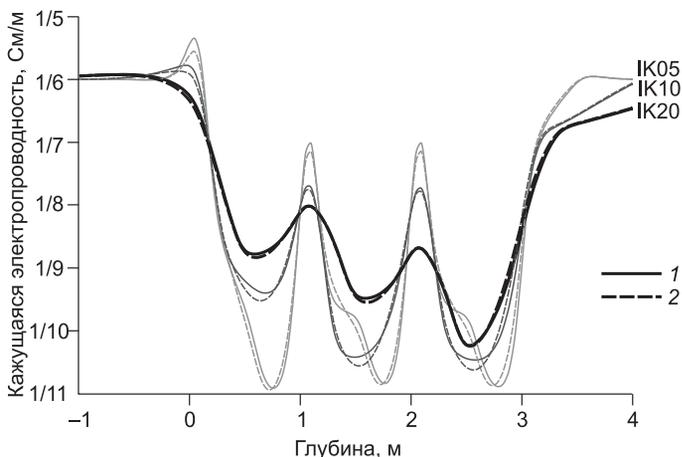
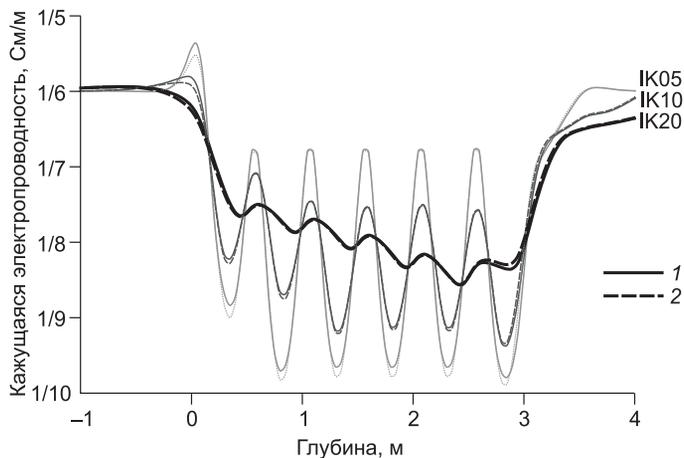


Рис. 6. Синтетические диаграммы в периодических моделях при описании электропроводности кусочно-постоянной (1), непрерывной (2) функциями.

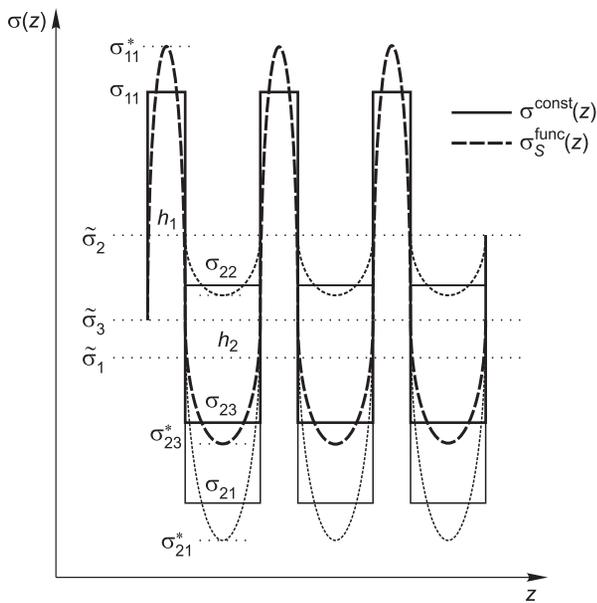


Рис. 7. Кусочно-постоянное и непрерывное распределения электропроводности нефтенасыщенного тонкослоистого коллектора, представленного песчанистыми прослоями с развитыми зонами проникновения.

ло 1/6.2 См/м. В моделях, характеризующихся чередованием тонких глинистых и песчанистых прослоев с развитой зоной проникновения, относительные погрешности моделирования при описании электропроводности непрерывными функциями незначительны: не более 0.4 % для зондов ИК05-07 и менее 0.1 % для ИК10-20. При этом максимальные значения $\delta\sigma_k$ достигаются вблизи кровли и подошвы коллектора, но и они составляют 0.5—1.5 %.

Рис. 8 иллюстрирует увеличение кажущейся электропроводности σ_k тонкослоистого коллектора при наличии глинистых прослоев. Здесь приведены диаграммы в модели однородного нефтенасыщенного пласта с параметрами песчанистого прослоя. Видно, что наличие тонких глинистых прослоев приводит к повышению значений σ_k в 1.25—1.5 раза. Аналогичные расчеты проведены для моделей в широком диапазоне геоэлектрических параметров слагающих прослоев заглинизированных водо- и нефтенасыщенных коллекторов. Во всех случаях относительные погрешности моделирования диаграмм не превышали 1—2 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к описанию электропроводности тонкослоистых песчано-глинистых коллекторов непрерывными периодическими функциями. На его основе создан эффективный алгоритм приближенного двумерного численного моделирования диаграмм электромагнитного каротажа. Рассмотрены диаграммы в тонкослоистых песчано-глинистых коллекторах, содержащих прослой различной мощности, причем часть из них с развитой зоной проникновения (включая окаймляющую). Проведен сравнительный анализ синтетических диаграмм при описании электропроводности кусочно-постоянными и непрерывными периодическими функциями. Показано, что использование непрерывных функций позволяет проводить моделирование с относительной погрешностью не более 5 %. Для более точной аппроксимации кусочно-постоянной функции непрерывной предложено учитывать усредненную электропроводность тонкослоистой среды. Выполненный большой объем численного моделирования и сравнительный анализ диаграмм в двумерных моделях терригенных тонкослоистых коллекторов нефтегазовых месторождений показал высокую эффективность предложенного подхода.

На основе представленных алгоритмов уже создана процедура восстановления геоэлектрических параметров тонкослоистого песчано-глинистого коллектора, основанная на определении осредненных эффективных значений мощности прослоев, удельной электропроводности и их дисперсии. Указанный подход к описанию электропроводности тонкослоистых коллекторов непрерывными функциями позволяет выделять тонкослоистые коллекторы по данным стандартных индукционных систем без привлечения многокомпонентных наблюдений.

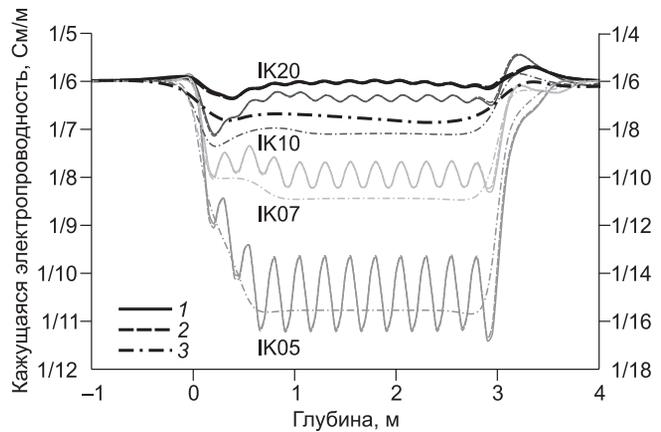


Рис. 8. Синтетические диаграммы в модели нефтенасыщенного тонкослоистого коллектора при описании электропроводности кусочно-постоянной (1), непрерывной (2) функциями, однородного нефтенасыщенного пласта (3).

репад значений σ_k быстро уменьшаются с увеличением длины зонда и его базы. Значения σ_k для двух коротких зондов изменяются от 1/11.2 до 1/9.5 См/м, от 1/8.2 до 1/7.5 См/м соответственно. Для более длинных зондов значения σ_k становятся близкими к усредненной электропроводности коллектора $\bar{\sigma}_3$ около

ЛИТЕРАТУРА

- Альпин Л.М.** Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважинах // Изв. вузов. Геология и разведка, 1978, № 4, с. 81—95.
- Альпин Л.М., Великин С.А.** Определение анизотропии по измерениям в скважинах // Изв. вузов. Геология и разведка, 1983, № 12, с. 97—99.
- Антонов Ю.Н.** Изопараметрическое каротажное зондирование // Геология и геофизика, 1980 (6), с. 81—91.
- Владимиров В.С.** Уравнения математической физики. М., Наука, 1988, 512 с.
- Даев Д.С.** Высоочастотные электромагнитные методы исследования скважин. М., Недра, 1974, 191 с.
- Долль Г.** Теория индукционного метода исследования разрезов скважин и его применение в скважинах, пробуренных с глинистым раствором на нефти // Вопросы промысловой геофизики. М., Гостоптехиздат, 1957, с. 252—274.
- Кауфман А.А.** Теория индукционного каротажа. Новосибирск, Наука, 1965, 236 с.
- Плюснин М.И.** Индукционный каротаж. М., Недра, 1968, 142 с.
- Рытов С.М.** Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // ЖЭТФ, 1955, т. 29, вып. 5, с. 605—616.
- Табаровский Л.А.** Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск, Наука, 1975, 140 с.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.** Геометрическая и частотная фокусировка при изучении анизотропных пластов // Электромагнитные методы исследования скважин. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1982, с. 67—129.
- Табаровский Л.А., Каганский А.М., Эпов М.И.** Электромагнитное поле гармонического источника в анизотропной цилиндрически-слоистой среде // Геология и геофизика, 1976 (3), с. 94—99.
- 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.
- Хисамутдинов А.И., Табаровский Л.А.** Пример монте-карловских вычислений в задачах электроразведки // Вычислительные проблемы математических задач геофизики. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1977, с. 106—112.
- 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.
- Эпов М.И., Глинских В.Н.** Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2005, 98 с.
- Эпов М.И., Глинских В.Н.** Алгоритм инверсии диаграмм высокочастотного электромагнитного каротажа при описании электропроводности среды непрерывными функциями // Технологии ТЭК, 2006, № 1 (26), с. 24—28.
- Habashy T.M., Groom R.W., Spies B.R.** Beyond the Born and Rytov approximations: a nonlinear approach to electromagnetic scattering // J. Geophys. Res., 1993, B2, p. 1759—1775.
- Wang T., Yu L., Fanini O.** Multicomponent induction response in a borehole environment // Geophysics, 2003, v. 68, № 5, p. 1510—1519.
- Zhang Zh., Yu L., Kriegshauser B., Tabarovsky L.** Determination of relative angles and anisotropic resistivity using multicomponent induction logging data // Geophysics, 2004, v. 69, № 4, p. 898—909.

*Рекомендована к печати 23 января 2009 г.
В.С. Селезевым*

*Поступила в редакцию
12 ноября 2008 г.*