УДК 517.946

М.И.ИВАНОВ, *инженер-программист*, *mxm@nsk.ru*
В.А.КАТЕШОВ, *канд. физ.-мат.наук*, *генеральный директор*, *kateshov@inbox.ru*
И.А.КРЕМЕР, *инженер*, *Kremer@aoritm.com*
ЗАО «Центр РИТМ», Новосибирск
М.И.ЭПОВ, *д-р техн. наук*, *академик РАН*, *директор*, *MEpov@uiggm.nsc.ru*
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, *Новосибирск*

M.I.IVANOV, *Engineer-programmer*, *mxm@nsk.ru*
V.A.KATESHOV, *PhDr. phys.-mat. Sci.*, *General director*, *kateshov@inbox.ru*
I.A.KREMER, *Engineer*, *Kremer@aoritm.com*
«*RITM-Center*», *Novosibirsk.*
M.I.EPOV, *Dr. tech. Sci.*, *Academician RAS*, *Director*, *MEpov@uiggm.nsc.ru*
Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, *Novosibirsk*

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ MODEM 3D ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Представлена программа MODEM 3D, предназначенная для прямого моделирования процессов становления электромагнитных полей, создаваемых источниками смешанного индуктивно-гальванического типа (заземленная горизонтальная электрическая линия) во временно́й области. На примере среды, содержащей неструктурную нефтяную залежь, продемонстрирована численная устойчивость применяемых алгоритмов.

Ключевые слова: 3D-моделирование, неоднородная проводящая среда, вызванная поляризация, временная область.

MODEM 3D NEW SOFTWARE FOR THE INTERPRETATION OF IP-AFFECTED 3D TEM DATA

MODEM 3D software is presented, which is intended for direct modeling of formation processes of electromagnetic fields created by compound inductance-galvanic type sources (earthed horizontal electrical line) in time domain. Numerical stability of used algorithms is displayed on the example of medium, which contains nonstructural oil pool.

Key words: 3D modeling software, inhomogeneous conducting medium, induced polarization, time domain.

Введение. Широкое применение нестационарных электромагнитных зондирований требует существенного расширения модельной базы, обеспечивающей, в первую очередь, анализ реальных трехмерных геологических ситуаций, и, как следствие, разработки соответствующего программно-алгоритмического обеспечения. В последние годы как в России, так и за рубежом создано немало программ, позволяющих моделировать нестационарные электромагнитные поля, возбуждаемые в среде замкнутыми токовыми контурами (индукционными источниками). Вместе с тем при поисках и оконтуривании нефтегазовых залежей электроразведка достигла значительных успехов, во многом благодаря изучению па-

раметров поляризуемости горных пород, полученных из данных метода становления от заземленных электрических линий. Соответствующая прямая трехмерная задача является существенно более сложной, чем в случаях индуктивного возбуждения и неполяризующейся среды. Это обусловлено несколькими причинами: появлением новых вторичных источников в среде, связанных с временной дисперсией электропроводности (появляется зависимость электропроводности от времени $\sigma(t)$); существенным расширением области, где необходимо учитывать электромагнитные поля за счет верхнего непроводящего (а точнее, слабо проводящего полупространства); необходимостью учета начальных условий, описываемых распределением электрического поля постоянного тока в трехмерной модели.

В работе сформулирована указанная выше задача и приведены особенности методов расчета. В качестве примера показаны результаты моделирования в среде, содержащей неструктурную нефтяную залежь.

Постановка задачи. Программа MODEM 3D предназначена для прямого моделирования процессов становления электромагнитных полей, создаваемых контролируемыми источниками $\bar{J}^S$ во временной области. Источники полей могут быть индуктивного (токовая петля), гальванического (круговой электрический диполь) и смешанного типов (заземленная горизонтальная электрическая линия). Программа реализует квазистационарную модель электромагнитного поля:

$$\mathrm{rot}\bar{H} = \bar{J}\,,\ \mathrm{div}\mu\bar{H} = 0\,,$$

$$\mathrm{rot}\bar{E} + \mu\frac{\partial\bar{H}}{\partial t} = \bar{0}\,,\ \mathrm{div}\bar{J} = 0\,,$$

здесь $\bar{E}$ и $\bar{H}$ – напряженности электрического и магнитного полей; $\bar{J} = \sigma\bar{E} + \bar{J}^S$ – плотность тока.

Модель трехмерной проводящей среды может быть произвольного вида. Помимо простых физических свойств: постоянных значений магнитной проницаемости μ и электрической проводимости σ в различных проводящих подобластях – возможен учет эффектов вызванной поляризации. Данные эффекты учитываются введением в частотной области комплексной проводимости, описываемой формулой Коль-Коль

$$\sigma(p) = \sigma(1 - \eta\frac{1}{1 + (p\tau)^c(1-\eta)})\,,$$

где p – частота; η – поляризуемость; τ – характерное время; c – постоянная (от 0,5 до 1,0).

В этом случае плотность тока во временной области записывается в виде свертки

$$\bar{J}(t) = \bar{J}^S(t) + \int_0^t \bar{E}(\xi)\sigma(1-\xi)d\xi\,.$$

Схема решения задачи предусматривает выделение первичных полей $\bar{H}^P$ и $\bar{E}^P$, которые формируются заданными источниками в однородном полупространстве с проводимостью σ^{P}. Оставшиеся поля $\bar{H}^A$ и $\bar{E}^A$, возникающие в силу неоднородности модели среды, являются аномальными и составляют суть решаемой численно задачи:

$$\bar{H} = \bar{H}^P + \bar{H}^A;\quad \bar{E} = \bar{E}^P + \bar{E}^A.$$

Для описания аномальных полей используются потенциалы. В воздухе используется скалярный магнитный потенциал Φ, а в проводящей среде – векторный магнитный потенциал $\bar{A}$:

$$\bar{H}^A = \begin{cases} -\nabla\Phi; \\ \dfrac{1}{\mu}\mathrm{rot}\bar{A}, \quad div\sigma\bar{A} = 0. \end{cases}$$

Связь аномального электрического поля с векторным магнитным потенциалом в проводящей среде выглядит следующим образом:

$$\bar{E}^A = -\frac{\partial\bar{A}}{\partial t} - \nabla U\,,$$

где U – скалярный электрический потенциал.

Исходная задача переписывается в терминах потенциалов, калибровочное условие для векторного магнитного потенциала $div\sigma\bar{A} = 0$ в явном виде включается в систему уравнений: в воздухе

$$-div\mu\nabla\Phi = 0,$$

в проводящей среде

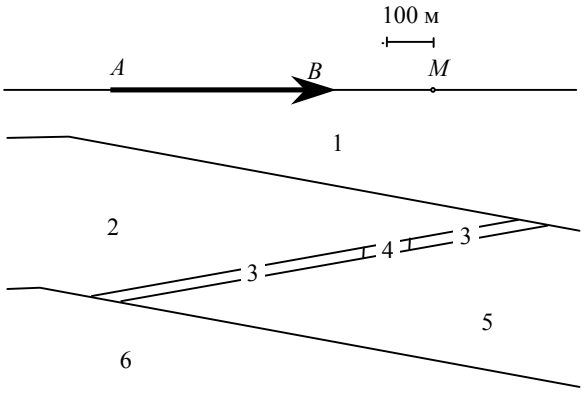


Рис.1. Модель неструктурной нефтяной залежи в разрезе

1 – рыхлые отложения; 2, 3 – глины; 4 – нефтенасыщенные песчаники; 5, 6 – аргиллит; *AB* – источник; *M* – точка наблюдения

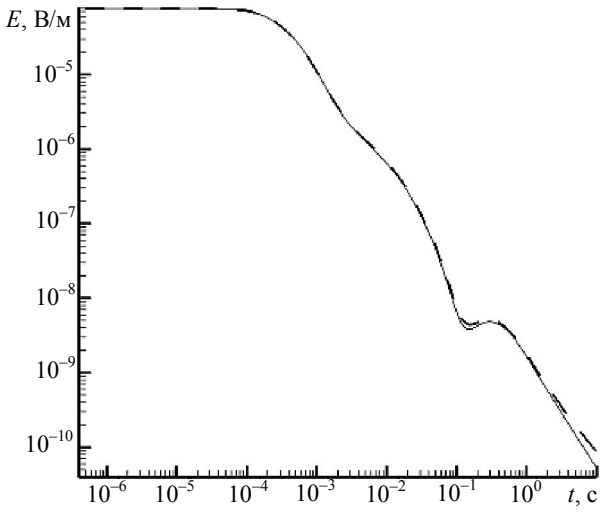


Рис.2. Горизонтальная компонента электрического поля в точке наблюдения

$$\begin{cases} \mathrm{rot}\dfrac{1}{\mu}\mathrm{rot}\overline{A} + \sigma\dfrac{\partial\overline{A}}{\partial t} = -\sigma\nabla U + (\sigma - \sigma^P)\overline{E}^P; \\ \mathrm{div}\sigma\overline{A} = 0. \end{cases}$$

На дневной поверхности ставятся условия сопряжения магнитных потенциалов:

$$\begin{cases} -\mu\nabla\Phi\cdot\overline{n} = \mathrm{rot}\overline{A}\times\overline{n}, \\ -\overline{n}\cdot\nabla\Phi = \overline{n}\times\dfrac{1}{\mu}\mathrm{rot}\overline{A}, \end{cases}$$

$\overline{n}$ – вектор нормали к дневной поверхности.

Численное решение сформулированной задачи осуществляется методом векторных конечных элементов.* Расчетная область разбивается на тетраэдры. На каждом из тетраэдров векторный потенциал $\overline{A}$ аппроксимируется элементами Неделека первого порядка второго типа. Для аппроксимации скалярных величин Φ, U используются элементы Лагранжа второго порядка. Интегрирование по времени осуществляется по схеме Кранка – Николсона. Предложенная схема обладает свойствами численной устойчивости как на ранних, так и на поздних временах.

Зондирование над неструктурной нефтяной залежью. Рассматривалась модель, содержащая неструктурную нефтяную залежь (рис.1). Верхний слой составляют рыхлые отложения мощностью от 100 до 400 м и удельным сопротивлением 50 Ом·м. Под отложениями располагаются глины (350 м, 3 Ом·м). Под глинами в песчанике, на глубине 500 м, находится нефтяная залежь. Мощность залежи составляет 25 м, удельное сопротивление 100 Ом·м, параметры поляризации $\eta = 0{,}05$, $\tau = 0{,}1$, $c = 1/2$. Нижняя часть модели – аргиллитовое основание с сопротивлением 100 Ом·м. В качестве источника рассмотрена горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ) *AB* длиной 500 м, точка наблюдения *M* расположена на оси ГЭЛ, на расстоянии 450 м от центра источника.

В различных вариантах расчетов изменялись горизонтальные размеры нефтяной залежи: 100×100 м, 400×400 м. Кривые становления горизонтальной компоненты электриче-

* Решение трехмерных стационарных задач импульсной электроразведки / М.И.Иванов, В.А.Катешов, И.А.Кремер, М.В.Урев // Автометрия. 2007. Т.43 (2). С.22-32.

Solution of 3D stationary Problems of DC Electrical Survey / M.I.Ivanov, V.A.Kateshov, I.A.Kremer, and M.V.Urev // Autometriya, 2007, N 2, V.43, pp.22-32.

Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки / М.И.Иванов, В.А.Катешов, И.А.Кремер, М.В.Урев // Автометрия. 2007. Т.43 (2). С.33-44.

Solution of 3D-nonstationary TEM Problems / M.I.Ivanov, V.A.Kateshov, I.A.Kremer, and M.V.Urev // Autometriya, 2007, N 2, V.43, pp.33-44.

ского поля в точке наблюдения *M* на дневной поверхности приведены на рис.2. Сплошная линия соответствует варианту с размерами нефтяной залежи 100×100 м. Пунктирная линия соответствует варианту залежи 400×600 м.

Заключение. Работоспособность программы MODEM 3D была самым тщательным образом проверена на более простых одномерных моделях. В тестировании принимали участие сотрудники ИНГГ СО РАН. Программа создавалась для самого широкого круга геофизиков, не владеющих тонкостями вычислительной математики. Программа MODEM 3D может стать важным инструментом не только для интерпретации данных 3D-зондирований, а также для решения методических вопросов постановки 3D-электроразведки.