

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ СУБВЕРТИКАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ В ЗАДАЧАХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ.

Эпов М.И., Штабель Н.В., Антонов Е.Ю.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

В работе рассмотрено пространственное распределение электромагнитного поля в областях с субвертикальными границами. Анализ распределения поля, полученного в результате трехмерного численного моделирования, показал взаимодействие вихревых токов от источника и поверхностных зарядов, наведенных на субвертикальной границе. В работе с помощью прямого трехмерного математического моделирования оценена допустимость описания наклонных границ более простыми моделями с горизонтальными и вертикальными границами. Анализ результатов показал, что подобная аппроксимация требует подробного разбиения, так чтобы толщина скин-слоя была сравнима с длиной аппроксимирующих отрезков.

Ключевые слова: электромагнитное поле, зондирование, численное моделирование

Основы теории нестационарных зондирований базируются на анализе пространственного распределения электромагнитного поля в горизонтально-слоистых моделях электропроводящих немагнитных изотропных геологических сред. При этом наиболее распространённая наземная установка состоит из двух замкнутых контуров (петель) – генераторного и приёмного. При выключении тока в контуре под поверхностью проводящего полупространства согласно закону индукции Фарадея формируется кольцевой вихревой ток. Вихревой ток образует движущуюся в пространстве тороидальную структуру, которая с течением времени после выключения погружается в среду, при этом ее радиус и площадь сечения увеличиваются. В проводящем полупространстве центр тороида движется по прямой траектории, наклоненной к его поверхности под углом примерно 28° [1, 2].

В случае присутствия в области негоризонтальных границ вихревое электрическое поле пересекает внутренние границы и на их поверхности возникают заряды, плотность которых пропорциональна среднему значению нормальной компоненты электрического поля на границе. Отметим их важную особенность: поверхностные заряды «привязаны» к границам и могут перемещаться только по ним. В то время как вихревой токовый тороид со временем перемещается во всём пространстве. В этом случае, особенно если наклонных границ в среде несколько, вихревые токи и поверхностные заряды взаимодействуют между собой. При этом традиционно принятое разделение поля на две моды – индукционную (вихревые токи) и гальваническую (заряды) – теряет физический смысл и не может в полной мере использоваться при анализе поведения нестационарного электромагнитного поля.

В настоящее время системы «трёхмерной» инверсии, как правило, базируются на классе моделей, состоящих из набора проводящих областей, разделённых между собой системой горизонтальных и вертикальных границ. Такое описание среды оставляет открытым вопрос об инверсии измеренных сигналов в весьма распространённых случаях, когда есть наклонные границы. Остаётся неясным, насколько адекватной является аппроксимация наклонной границы набором горизонтальных и вертикальных плоскостей. Из физических соображений ясно, что при их большом числе значения нестационарных электромагнитных полей в этих двух моделях будут сближаться между собой. При небольшом числе аппроксимирующих горизонтальных и вертикальных плоских границ и на наклонной границе распределение поверхностных зарядов будут существенно различаться между собой. На наклонной границе оно непрерывно, а на горизонтальных границах их плотность будет меняться скачком.

В работе с помощью прямого трехмерного математического моделирования оценена допустимость описания наклонных границ более простыми моделями с горизонтальными и вертикальными границами. Для простоты рассмотрим модель с одной наклонной (под углом в 40°) плоскостью, разделяющей две области разной электропроводности. Будем аппроксимировать её совокупностью вертикальных и горизонтальных поверхностей, образующих «ступени». Определим

число и размеры «ступеней», необходимых для аппроксимации наклонной границы, так, чтобы нестационарные поля на поверхности полупространства отличались между собой не более, чем на 1-3%. Рассмотрим последствия модельного несоответствия при инверсии таких сигналов в рамках горизонтально-слоистых моделей.

Расчеты показали, что при грубом представлении наклонной границы совокупностью из 2 вертикальных и 2 горизонтальных поверхностей максимальное отклонение измеренной э.д.с. для такой модели составило 34% по сравнению с одной наклонной плоскостью. Совпадение кривых э.д.с. с учетом допустимой погрешности в 1.4% было достигнуто при аппроксимировании наклонной плоскости с помощью 32 горизонтальных и 32 вертикальных плоскостей. При этом размер «ступени», образованной этими плоскостями составил около 1/3 размера генераторной петли. Аппроксимация наклонной границы набором ступенчатых границ требует подробного разбиения, так чтобы толщина скин-слоя была сравнима с длиной аппроксимирующих отрезков.

Были рассмотрены следующие модели среды, содержащие наклонные границы (рис. 1а-в): модель 1 представляет собой проводящую область, разделённую наклонной плоскостью, которая пересекает дневную поверхность на расстоянии 500 м от центра установки под углом $\theta=40^\circ$. Подобласть справа от наклонной границы характеризуется значением УЭС 200 Ом·м, а слева – 10 м·м. Модели 2 и 3 построены на базе модели 1 путём добавления слева дополнительной наклонной границы под углом 90° на глубине 500 и 100 м соответственно (рис. 1б-в). Средняя область, ограниченная наклонными плоскостями, имеет сопротивление 5 Ом·м или 1000 Ом·м.

Трёхмерное численное моделирование электромагнитных полей векторным методом конечных элементов даёт решение прямой задачи во всей расчётной области. Это даёт возможность изучить поведение во времени напряжённости электрического поля, плотности вихревых токов, а также зарядов на поверхностях контактов областей с разной проводимостью.

В модели 1 наклонная граница разделяет две контрастные (в 20 раз) по УЭС области. Токовый тороид, начинает распространяться в правой подобласти с сопротивлением 200 Ом·м. Характер распространения вихревых токов до 70 мкс такой же, как в однородной среде. Выделим два направления передвижения центра токового тороида в перпендикулярном по отношению к наклонной границе плоскости. Будем называть «левой траекторией» траекторию смещения центра тороида по направлению к наклонной плоскости. И «правой» - движение в противоположном направлении, т.е. от наклонной плоскости к границе области. На начальных временах правая траектория направлена под углом $\sim 28^\circ$ к дневной поверхности. Угол падения левой траектории равен $\sim 152^\circ$ (или -28°). К моменту 70 мкс токовый тороид, состоящий из вихревых токов, плоскопараллельных к дневной поверхности, подходит к наклонной границе и начинается процесс перераспределения токов в среде.

Наклонная плоскость является межфрагментарной границей, разделяющей две контрастные по своим свойствам среды, на которой должны выполняться условия непрерывности полей и токов. Токовый тороид содержит в себе две ненулевые компоненты: ориентированную под углом в 90° к границе компоненту J_x и тангенциальную к границе компоненту J_y . Напряженность электрического поля также имеет две компоненты, поскольку связана с током через закон Ома $J=\sigma E$.

Одним из условий непрерывности на межфрагментарных границах является непрерывность нормальной компоненты тока и скачек нормальной компоненты электрического поля, пропорциональный отношению электропроводностей сред. Для выполнения условия непрерывности тока на наклонной поверхности в диапазоне времен 0.07-0.3 мс формируются поверхностные заряды, под влиянием которых изменяется напряженность электрического поля и конфигурация токов в среде. Вблизи наклонной границы под действием наведенных зарядов возникает третья компонента электрического поля E_z , которая совместно с E_x образуют нормальную компоненту поля $\vec{E}^n = \vec{E} \times \vec{n}$.

По мере приближения токового тороида по левой траектории к границе изменяется конфигурация его изоповерхностей. В однородной среде все токовые изоповерхности имеют вид тороидов различной толщины с единым центром. При взаимодействии электрического поля с наклонной плоскостью изоповерхности тока изменяются и представляют собой структуру, объединяющую в себе тороид и некоторую изоповерхность, расположенную в плоскости наклонной границы (рис. 1г). В диапазоне времен 0.1-0.2 мс изоповерхности тороида претерпевают разрыв, начиная с центров тороида (изоповерхности с максимальными значениями), превращаясь в незамкнутый токовый жгут и затухают. В то время как на наклонной плоскости отмечается рост значений тока и форма изоповерхностей напоминает проекцию незамкнутых токовых жгутов на плоскость.

К моменту времени 0.7 мс токи в правой подобласти (сопротивление 200 Ом·м) полностью перешли через наклонную плоскость в подобласть с сопротивлением 10 Ом·м, сформировав вблизи межфрагментарной границы новую систему токов. Сформированный токовый жгут имеет ассиметричную форму, вытянутую вдоль наклонной плоскости. Максимальные значения токов сосредоточены в верхней части токового жгута и их изоповерхности напоминают форму полумесяцев, направленных концами вниз. Изоповерхности с меньшими значениями, но большой площадью поверхности замыкаются с центром на глубине ~350-400 м. Сформировавшись, токовый жгут новой конфигурации начинает распространяться в левой подобласти, не изменяя своего наклона, т.е. параллельно наклонной плоскости.

Модель 2 содержит в себе две наклонных плоскости. Обозначим «граница 1» - наклонную границу, такую же как в модели 1, проходящую под углом $\theta=40^\circ$ к дневной поверхности. И «границей 2» дополнительную наклонную границу, перпендикулярную к границе 1. Подобласть, лежащую справа от границы 1 будем назвать правой областью. Часть области, ограниченную границами 1 и 2 средней областью и оставшаяся часть среды, лежащая левее границ 1 и 2, соответственно левой областью. Контраст сопротивлений на границе 2 составляет 2 раза (УЭС средней области 5 Ом·м) или 100 раз (УЭС средней области 100 Ом·м). Контраст УЭС на границе 1 составляет в 20 раз до глубины 500 м и в 2 или в 100 раз на глубинах больших 500 м, в зависимости от УЭС средней области.

Токовый жгут начинает своё распространение в модели 2 аналогично модели 1, т.е. приближается к границе 1, взаимодействует с ней и изменяет свою конфигурацию, переходя в левую подобласть. Дальнейшее поведение токов зависит от УЭС средней области. При высокой проводимости средней области токи, сформированные вблизи верхней части границы 1 частично стекают в среднюю область, и распространяются в ней преимущественно вытягиваясь вдоль границы 1. В областях с низким сопротивлением (УЭС 5 Ом·м) скорость распространения тока небольшая, также наблюдается высокая скорость затухания токов.

Распределение зарядов на границе 1 показывает максимальную концентрацию зарядов (~ 2 мВ/м) в момент прохождения токового жгута из правой подобласти в левую. По мере перемещения токов в левую подобласть заряды имеют тенденцию к затуханию и распространению в плоскости границы вниз. На границе 2 небольшое количество зарядов (~ 10 мкВ/м) сосредоточено вблизи линии пересечения границ 1 и 2 в диапазоне времен 0.1 – 0.7 мс. В дальнейшем токи, находящиеся в средней области затухают и отходят от границы 2, но со стороны левой области наблюдается приближение токового максимума к границе и распределение зарядов величиной ~3 мкВ/м до глубин ~800-900 м.

В случае, когда средняя область имеет высокое сопротивление (1000 Ом·м) нижняя часть тока, оказавшегося в левой области, не проникает в среднюю область, а изменяет направление своего распространения. Нижняя часть токового жгута движется вдоль границы 2 влево. Токовый максимум, сосредоточенный в верхней части токового кольца, расширяется в левой области в сторону внешней границы. Форма токовых изоповерхностей в середине расчётной области повторяет форму границ 1 и 2, ограничивающих ток.

Распределение наведённых зарядов на границе 2 характерно для картины взаимодействия тока с наклонной плоскостью: два разноименных полюса зарядов распространяются вдоль плоскости границы 2. На границе 1, начиная с времен 0.3 мс, можно выделить линию пересечения границ 1 и 2. Наведённые заряды в основном концентрируются выше линии пересечения, частично компенсируясь зарядами противоположного знака, возникающими в небольшой окрестности ниже линии пересечения границ 1 и 2.

Модель 3 отличается от модели 2 меньшим заглублением линии пересечения границ 1 и 2 (заглубление составляет 100 м). Однако это существенно меняет поведение поля и токов. Расширяясь на ранних временах (до 0.1 мс) токовый жгут сразу попадает в область пересечения трёх различных по сопротивлению сред: правая область, в которой находится максимум тока (УЭС 200 Ом·м), левая область (УЭС 10 Ом·м) и средняя область с сопротивлением 5 Ом·м или 1000 Ом·м.

В случае низкоомной средней области токи выбирают область с наименьшим сопротивлением, т.е. токовый максимум полностью переходит в среднюю область. Форма токов аналогична токовому жгуту, сформировавшемуся в левой области в модели 1. В дальнейшем токовый жгут расширяется в средней области между границами 1 и 2. Ток преимущественно направлен параллельно границе 1 и расширяется вдоль границы и вниз. Токовый максимум искажается, прижимаясь к границе 2, и расширяется вдоль и вниз.

Для высокоомной средней области поведение токов противоположно. Токовый максимум полностью переходит в левую область и распространяется только в левой области. Токовый жгут принимает угловую форму левой подобласти, прижимаясь к внутренним границам 1 и 2 с левой стороны. В картине распределения наведенных зарядов на границе 1 видно, что формирование зарядов происходит только до глубины 100 м, т.е. в области меньшего контраста УЭС. На границе 2 распределение зарядов соответствует обычному распределению зарядов на наклонной плоскости.

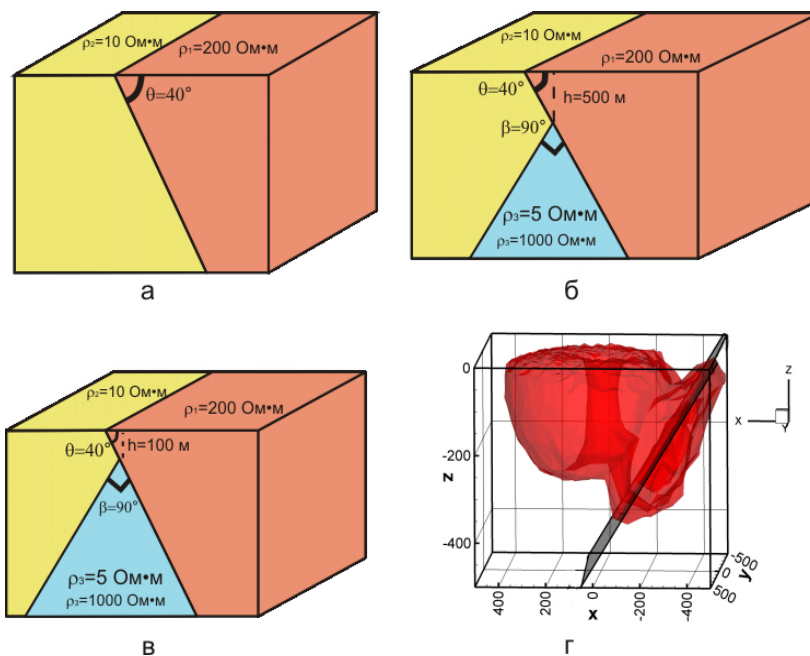


Рис. 1. Геометрия расчётных областей для модели 1 (а), модели 2 (б) и модели 3 (в), форма максимальной изоповерхности тока для модели 1 вблизи наклонной границы в момент времени 0.1 мс (г)

1. Nabighian M.N. Quasi-static transient response of a conducting half-space: An approximate representation // *Geophysics*. – 1979. – V. 44. – P. 1700-1705.
2. Эпов М.И., Сухорукова К.В., Ангонов Е.Ю. Кинематика нестационарного электромагнитного поля в слоистых проводящих средах // *Теория и практика магнитотеллурического зондирования (тезисы докладов конференции Москва 20-23.12.1994)*. – с. 11-12.