

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ И ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК
ПРИ КАРТИРОВАНИИ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ
ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ**

Александр Николаевич Шеин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383)330-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Евгений Юрьевич Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики, тел. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В работе обсуждаются результаты 3D-моделирования с помощью программы MODEM3D индукционных переходных характеристик над объектами цилиндрической и конической формы для установок QQ-n и ABMN-n. Моделирование позволяет дать положительное заключение об использовании гальванической установки для конкретной геологической ситуации. Анализ отклонений сигналов по профилю относительно отклика референтной среды позволяет выполнять качественные оценки глубины залегания и геометрических размеров структур.

Ключевые слова: математическое моделирование, зондирование становлением поля.

**INVESTIGATION OF POSSIBILITIES OF GALVANIC AND INDUCTION
TEM-SOUNDING SYSTEMS FOR MAPPING 3D OBJECTS BY TEM**

Alexandr N. Shein

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Research Scientist, tel. (383)333-41-22, e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

Evgeniy Yu. Antonov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Research Scientist, Doctor of Sciences, Head of the Laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper presents the results of 3D modelling (program MODEM3D) of transient induction responses to cylindrical and conical objects for QQ-n and ABMN-n measurement system. Numerical modeling allows to give a positive opinion on the use of the electrical arrays for a specific geological situation. Analysis of relative deviations (with respect to the response of the reference medium) allows make qualitative estimates the depth and geometry of structures.

Key words: mathematic modeling, transient electromagnetic sounding.

В последние два десятилетия в России и за рубежом достигнут значительный прогресс в разработке программных средств для трёхмерного моделирования электромагнитных полей. Одной из передовых разработок в данной обла-

сти является программный комплекс для расчета нестационарных электромагнитных полей в трёхмерных проводящих и поляризующихся средах – Modem3D (авторы Кремер И.А., Иванов М.И.) [1]. Задача моделирования установливающегося электромагнитного поля решается векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной сетке. Для повышения производительности программы Modem3D алгоритмы были распараллелены, что позволило эффективно использовать многоядерность современных процессоров. Также для выполнения массовых расчётов была выполнена адаптация программы Modem3D для работы в системе распределённых вычислений (GRID-система) и облачных средах, организованных в ИНГГ СО РАН [2]. Тестирование программы на простых геометрических объектах и в случае горизонтально слоистых сред показало, что для широкого класса моделей расчёты выполняются с высокой точностью [3]. В работе демонстрируются возможности программы Modem3D при исследовании возможностей многоразностных установок для зондирования становлением поля Q-q-n и АВМN-n. По результатам моделирования делается заключение о перспективности каждой из установок. Также предлагается способ качественной оценки глубины залегания и геометрических размеров структур.

Для достижения поставленной цели в программе Modem3D была построена тетраэдральная сетка для модели гряды из четырёх объектов (рис. 1) с центром декартовой системы координат в середине гряды (между 2 и 3 объектами) и осью X, проходящей через их центры. Верхний перекрывающий слой составлял 800 м и 1200 м, радиусы верхних окружностей объектов варьируются от 2 до 5 км. Конические объекты имеют угол наклона 30° при расширении и 10° при сужении с глубиной, высота объектов – от 3,1 до 3,4 км. Соппротивление всех объектов было 200 Ом·м, а вмещающей была двухслойная среда с параметрами $\rho_1 = 2$ Ом·м, $h_1 = 4000$ м, $\rho_2 = 50$ Ом·м. Расчет проводился для 2-х установок. Первая установка АВМN-n с длиной источника 4 Км, приемников – 250 м. Линия приемников расположена на прямой параллельной к источнику на расстоянии 500 м. Приемники расположены от -1500 м до 1500 м относительно центра источника с шагом 100 м. Вторая установка Q-q-n представляет собой установку петля в петле с размерами генератора 4000x1000 м и приемников 100x100 м. Приемники расположены от -1500 м до 1500 м по центру вдоль длинной оси источника с шагом 100 м. В итоге имеем 31 кривую становления для каждого положения генераторных линии или петли, которые перемещались с шагом 2000 м от -17000 м до 17000 м на оси X. На рис. 1 помимо объектов схематично приведены установки в крайних положениях.

Перед выполнением массовых расчетов были проделаны необходимые тесты. Расчетная область проверялась на достаточность размеров для выполнения условий «большого бака». Построенная сетка исследовалась на совпадение с одномерной средой путем сравнения с одномерными расчетами программами UnvQQ и UnvLL (автор – Антонов Е.Ю.). Сравнение проводилось для референтной среды: $\rho_1 = 2$ Ом·м, $h_1 = 4000$ м, $\rho_2 = 50$ Ом·м. Помимо тестов были

проведены предварительные расчеты. Исследовалось совпадение расчетов для трехмерной модели с одним объектом и для модели гряды над соответствующим объектом. Также был проведен тест на аддитивность поля, который показал, что аномальное поле для 2-х трехмерных объектов можно с хорошим приближением заменить суммой аномальных полей отдельных объектов. Все тесты и предварительные расчеты оказались успешными, а составленная сетка – пригодной для дальнейших трёхмерных расчетов.

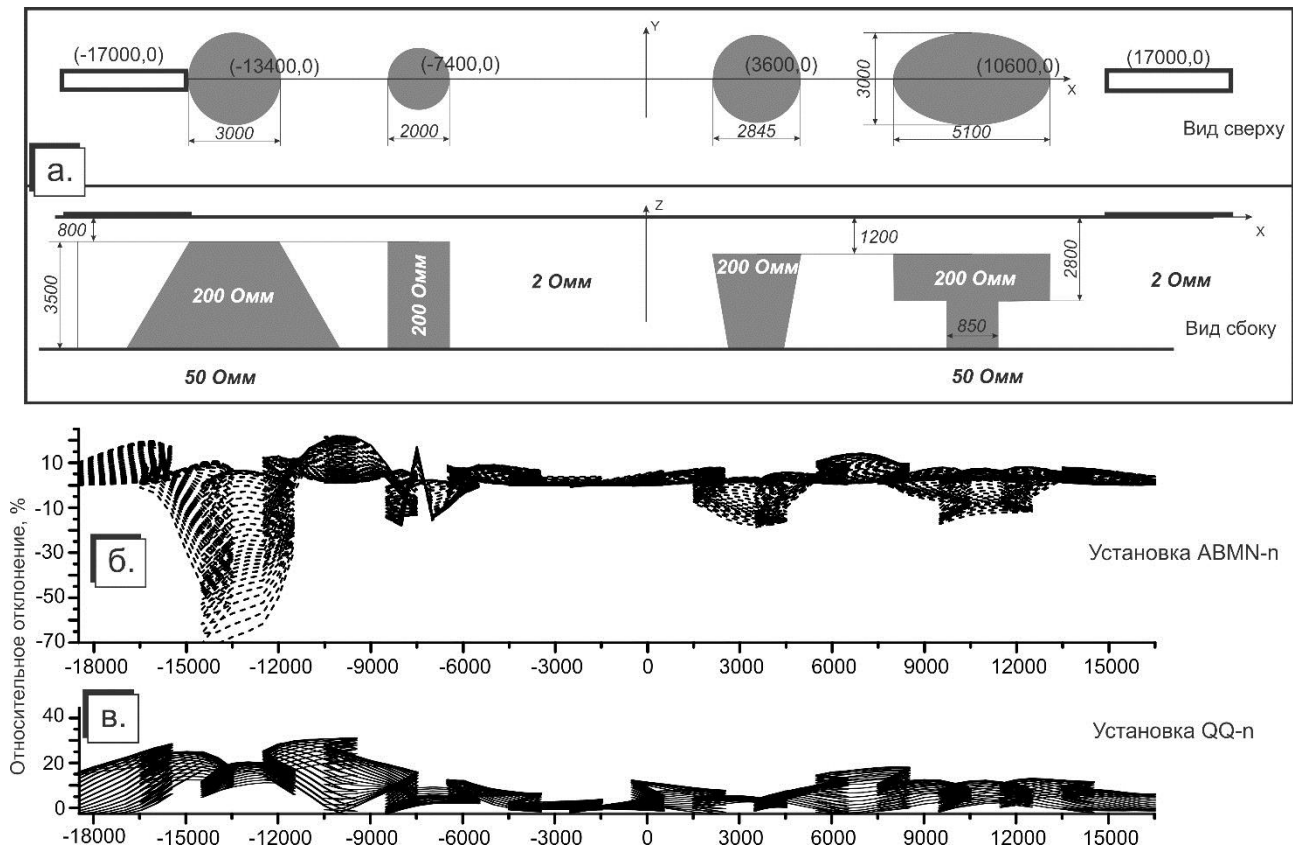


Рис. 1. Вид сверху и вид сбоку модели гряды (а), отклонение рассчитанного сигнала относительно становления над референтной средой для установок АВМN-п (б) и QQ-п (в)

Были произведены расчеты откликов среды для трёхмерной модели по профилю, пересекающему все объекты от -17000 м до 17000 м по оси X. Для визуализации результатов моделирования были вычислены относительные отклонения трехмерного отклика от рассчитанных кривых референтного сигнала (в нашем случае это расчет для крайнего положения установки на профиле с координатами (17000,0), где сигнал близок отклику слоистой модели среды). После того как мы рассчитали относительные отклонения на всем промежутке времени измерений, появилась возможность локализации временного интервала, который позволил оценить глубины целевых объектов. Был выбран отрезок от 0,05 до 5 сек. На рис. 1 представлены соответствующие значения относи-

тельного отклонения сигналов по профилю для установки АВМN-n (рис. 1б) и Q-q-n (рис. 1в). Хорошо видно, что построенные относительные отклонения хорошо коррелируют с геометрией моделируемых объектов и в какой-то мере позволяет оценить её геометрические размеры.

Рассмотрим отдельно каждую установку. Профиль, рассчитанный для установки АВМN-n, хорошо коррелирует с формой и глубиной залегания объектов. Первый, самый большой объект (усеченный конус, расширяющийся с глубиной под углом 30°), выделяется на профиле сильнее всего. Относительные отклонения, возникающие над данным объектом, достигают 70 % (от -15000 до -12000 по профилю, рис. 1б). Склоны конуса также выделяются: меняется знак относительного отклонения с минуса на плюс (отрезки -18000 до -15000 и -12000 до -9000, рис. 1б). Всего же область влияния этого объекта распространяется на 9000 м. Следующий объект, цилиндр с диаметром 2000 м, также выделяется. Область влияния такого объекта значительно меньше, его видно от -9000 до -7000 на профиле. Отклонения также невелики, не превышают 20–25 %. Оставшиеся 2 объекта погружены еще на 400 м ниже, что сказывается на размере аномалии. Относительные отклонения над этими объектами не превышают 25 %. Тем не менее объекты отчетливо выделяются. Размеры объектов и возмущений сигналов на профиле хорошо коррелируют (-1500 до 4500 и от 9000 до 12000, рис. 1б). Таким образом, можно сделать вывод, что с помощью гальванической установки АВМN-n можно выполнить качественные оценки глубины залегания и геометрической формы объекта.

Вторая установка Q-q-n в данном случае является наименее перспективной, потому что более всего ориентирована на выделение проводящих объектов. На профиле выделяется только первый объект – усеченный конус, расширяющийся с глубиной под углом 30° . Относительные отклонения над ним достигают 30 %. Вторым объектом сливается с первым, а третий и четвертый можно выделить лишь по косвенным признакам. Таким образом, если в первом случае выделяются все объекты с достаточно хорошей точностью, то для индукционной установки Q-q-n можно выделить только большие и неглубокозалегающие объекты.

Таким образом, рассматриваемые объекты лучше всего проявляются в результатах зондирования при использовании установок с заземленными питающей и измерительной линиями. Иными словами, при изучении рассматриваемых структур геологическая информативность установки АВ-MN выше по сравнению с любой другой, т.е. такой, где хотя бы один элемент представлен петлей или рамкой (Q – q, АВ – q, Q – MN).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- программа Modem3D позволяет проводить высокоточные расчеты переходных процессов для разных зондирующих установок (петля-петля (Q-q), линия-линия (АВ-MN), для геоэлектрических моделей со сложными трехмерными объектами;

- анализ отклонений сигналов по профилю относительно отклика референтной среды при наличии определённой априорной информации позволяет выполнять качественные оценки глубины залегания и геометрических размеров структур;

- анализ результатов моделирования позволяет дать положительное заключение об использовании той или иной установки для конкретной геологической ситуации (выбрать наиболее эффективную установку по результатам модельных расчетов) и дать методические рекомендации, позволяющие повысить геолого-геофизическую информативность и качество импульсных электромагнитных зондирований.

Авторы благодарят И.А. Кремера и М.И. Иванова за предоставленную возможность использовать программу Modem3D для научных расчётов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И. Программное обеспечение Modem3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института. - 2009. - Т. 183. - С. 242–245.

2. Мартьянов А.С., Мартьянов А.С., Тейтельбаум Д.В., Сердюк К.С., Власов А.А., Ельцов И.Н. Использование свободных сетевых ресурсов предприятия для решения емких вычислительных геофизических задач // Каротажник. - 2011. - № 11(209). - С. 56–64.

3. Шеин А.Н. Особенности программы для расчёта нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах Modem3D // Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2: материалы. - Старооскольский филиал ФГЮОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица». - Старый Оскол, 2013. - С. 99–104.

© А. Н. Шеин, Е. Ю. Антонов, 2015