

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ MODEM3D ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

Шейн А.Н., Антонов Е.Ю.

*ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

В работе приводятся возможности программы Modem3D для моделирования переходных процессов. В качестве примеров разбирается моделирование сигналов над соляно-купольными структурами. Другой пример – интерпретация данных ЗС полученных над Пихтовской интрузией (Новосибирская область).

Ключевые слова: математическое моделирование, зондирование становлением поля.

THE PRACTICAL APPLICATION OF THE PROGRAM MODEM3D FOR THE SIMULATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SIGNALS

Alexandr N. Shein, Evgeniy Yu. Antonov

IPGG SB RAS

The paper presents the possibility Modem3D program for modeling transients. For example, we discuss simulation signals over the salt-dome structures. Another example - the interpretation of the TEM-data obtained over Pihovskoy intrusion (Novosibirsk region).

Key words: mathematic modeling, transient electromagnetic sounding.

В настоящее время вместе с сейсморазведкой все чаще применяются несейсмические методы, одним из которых является метод зондирования становлением поля (ЗС). В последние два десятилетия в России (Друскин В.Л., Книжнерман Л.А., Кремер И.А., Табаровский Л.А., Эпов М.И., Рабинович М.Б., Шурина Э.П., Штабель Н.В., Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г. и др.) и за рубежом (Newman G.A., Hohmann G.W. Anderson W.L., Zhdanov M.S., Everett M.E. и др.) достигнут большой прогресс в разработке теоретической базы и программных средств для решения прямых задач нестационарной геоэлектрики в сложнопостроенных (двух- и трехмерных) средах. Многие из подходов основаны на конечно-разностных и конечно-элементных алгоритмах решения уравнений Максвелла (Кремер И.А., Шурина Э.П., Штабель Н.В., Zhdanov M.S. и др.). Другие исследователи используют метод возмущений, который основан на расчете аномального поля от заданного аномального объекта (Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г. и др.). Что касается трехмерной инверсии и дальнейшей интерпретации данных, то это направление все еще вызывает огромное количество вопросов и ставит множество проблем и задач. Разработан ряд подходов к инверсии, но все они носят больше приближенный характер и, чаще всего, сильно зависят от априорной информации.

Несмотря на постоянное развитие трехмерных подходов в геоэлектрике, в настоящее время для интерпретации данных нестационарных электромагнитных зондирований используются в основном одномерные модели. В данной работе приводится пример программное средство Modem3D (авторы: Иванов М.И., Кремер И.А., ИНГГ СО РАН, [Иванов и др., 2007, 2009]), которое позволяет в некоторой степени приблизиться к трехмерной интерпретации данных зондирования становлением поля. Программа предназначена для расчета импульсных электромагнитных полей в сложных трехмерных проводящих средах и реализована как интегрированная среда с полным набором графических функций для ввода данных, организации вычислительного процесса и анализа результатов расчетов. Задача моделирования устанавливаемого электромагнитного поля решается векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной пространственной сетке. Интегрирование по времени осуществлялось с использованием неявной схемы Кранка-

Николсона второго порядка точности.

Для повышения производительности программы Modem3D алгоритмы были распараллелены, что позволило эффективно использовать многоядерность современных процессоров. Распараллеливание применялось к векторно-матричным арифметическим операциям. Также для выполнения массовых расчётов была выполнена адаптация программы к работе в системе распределённых вычислений (GRID-система) и облачных средах, организованных в ИНГГ СО РАН [Мартьянов, 2011]. Тестирование на простых геометрических объектах и в случае горизонтально слоистых сред показало, что для широкого класса моделей расчеты выполняются с высокой точностью [Шеин, 2013].

Продemonстрируем возможности программы для расчета процессов становления в геоэлектрических моделях сред со сложной трехмерной поверхностью одного из горизонтов среды (рис. 1), который соответствует солянокупольной тектоники. Существенная разница в значениях удельного электрического сопротивления пород, составляющих соляные купола ($\rho = 200\text{--}20000$ Ом·м), и надсолевых комплексов в мульдовых зонах ($\rho = 2\text{--}10$ Ом·м) обуславливает их хорошую дифференциацию в интегральных геоэлектрических параметрах. На рисунке 1 представлен рельеф границы раздела 1-го и 2-го слоя, где изолиниями показана глубина залегания второго слоя, а красной линией расположение одного из профилей - АВ, вдоль которого выполнялось моделирование.

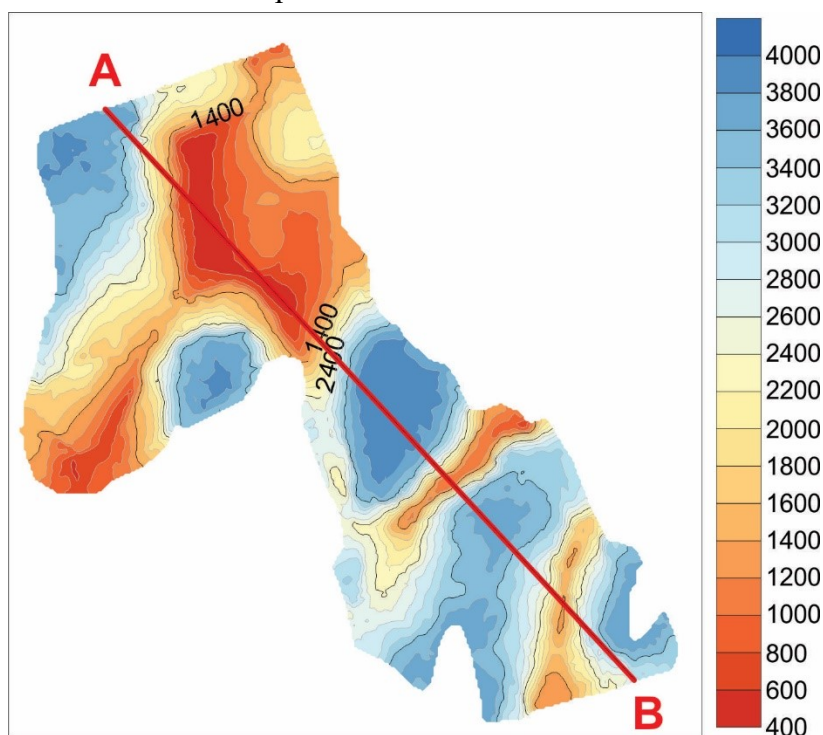


Рисунок 3 – Рельеф границы раздела первого и второго слоя, тестовый профиль для расчета АВ

Для того чтобы создать тетраэдральную сетку для такой сложной поверхности была использована программа Gmsh (С. Geuzaine and J.-F. Remacle., 2009), а в программе Modem3D была реализована возможность импорта таких сеток. Пользуясь описанной схемой была построена модель среды со следующими параметрами: сопротивление первого перекрывающего слоя – 2 Ом·м, мощность варьируется от 400 до 4400 м; сопротивление второго слоя – 200 Ом·м, а нижнее плоское основание находится на глубине 4500 м, сопротивление подстилающего третьего слоя – 50 Ом·м. Расчеты проводились для установки с источником и приемниками в виде заземленных электрических линий (ABMN). Длина источника АВ составляла 4000 м, приемника 250 м. Для одного положения генераторной линии АВ выполнялось 31 измерение по параллельному профилю, удалённому на 500 м от источника. Приемники располагались в интервале от -1500 м до 1500 м относительно центра источника с шагом 100 м.

После выполнения обязательных тестов были произведены расчеты откликов среды для трёхмерной модели по профилю АВ, вертикальное сечение которого представлено на рисунке 2, сверху. Для визуализации результатов моделирования были вычислены относительные отклонения трехмерного отклика от рассчитанных кривых референтного сигнала (в нашем случае это расчет для первого положения установки на профиле АВ, где сигнал удовлетворительно соответствует слоистой модели среды). После того как мы узнали относительные отклонения на всем расчетном промежутке времени, появилась возможность локализации временного интервала, который соответствует глубине целевого горизонта. Был выбран отрезок от 0,05 до 2 сек. На рисунке 2 (снизу) представлены соответствующие значения относительного отклонения сигналов по профилю АВ. Как видно на рисунке 2 (снизу), построенные относительные отклонения хорошо коррелируют с геометрией моделируемой поверхности и в какой-то мере позволяет оценить её геометрические размеры.

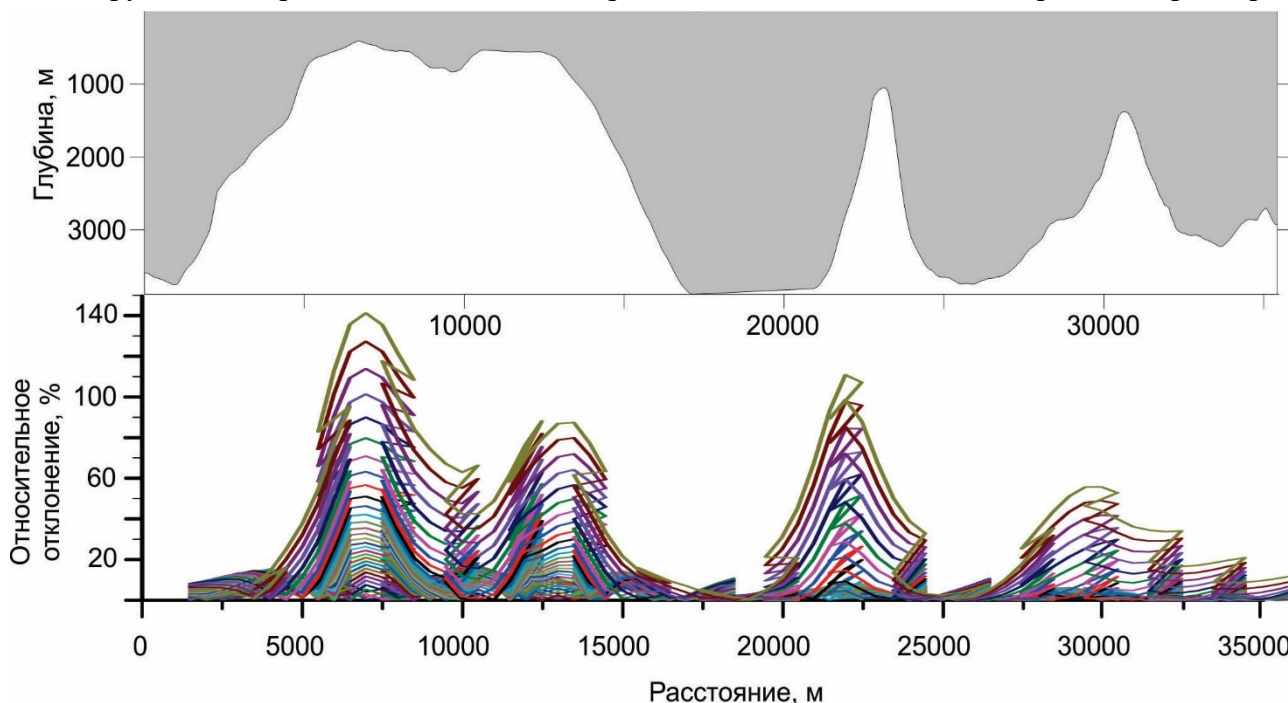


Рисунок 4 – Сечение по профилю АВ(сверху) и отклонение рассчитанного сигнала относительно становление над референтной средой (снизу)

Другой пример относится к интерпретации реальных данных. Предлагается поэтапное построение трехмерная геоэлектрической модели на примере Барабинско-Пихтовской моноклинали Пихтовская интрузия (Новосибирская область): первый этап – одномерная инверсия, второй – создание единой трехмерной модели по средствам программы Modem3D. Фундамент этого участка, как было обнаружено еще 1955 году характеризуется от нуля до нескольких километров, а также присутствием меридиональной зоны, проводимость которой образует резкий скачок (от десятков сотен, до нескольких тысяч См) [Ваньян, Кротевич, 1967]. Контуры и природа этой проводящей зоны до сих пор не установлены. Мы подтвердили то, что аномальная проводимость данной зоны не связана с трехмерными неоднородностями.

В 2010 году ЗАО НППГА «Луч» совместно с ИНГГ СО РАН проводили работы, в том числе методом ЗС на Барабинско-Пихтовской моноклинали, Пихтовская интрузия (Новосибирская область). Измерения были выполнены совмещенной и разнесенной петлевой установкой (генератор 200х200 м, приемник 50х50 м, разнос 200 м), схема измерений представлена на рисунке 3а. Первым этапом обработки данных зондирования становлением (ЗС) была одномерная инверсия для каждого пикета, которая проводилась Антоновым Е.Ю. с помощью программы Inv_QQ (авторы Антонов Е.Ю., Эпов М.И.).

На втором этапе интерпретации данных ЗС была построена трехмерная геоэлектрическая модель по двум профилям (профиль 1: 101-110, 21-28, 29-44; профиль 2: 121-130; 02-15), обозначенным на схеме измерений (рис. 3а) красной и зеленой линией. Разрезы по указанным

профилям представлены на рисунке 3б-в. Построение проходило в несколько итераций: сначала строилась трехмерная модель в соответствии с полученной одномерной, затем модель корректировалась в наиболее проблематичных (плохо-подобренных) местах.

При анализе трехмерной модели можно заметить, что в северо-западном направлении (профиль 1) и в северном направлении (профиль 2) мощность проводящего слоя (0.2-0.4 Ом) увеличивается и достигает мощности 600 м. В обратных же направлениях мощность рассматриваемого слоя уменьшается и сопротивление увеличивается (0.7-1.2 Ом). Поэтому можно сделать вывод, что в юго-восточном направлении аномально проводящая зона пропадает. Это хорошо видно на первом профиле (рис. 3б).

В итоге построена трехмерная модель среды, для которой СКО практических данных от рассчитанных для всех, за редким исключением, установок изучаемой площади не превышает 0,1. С учетом ручного подбора трехмерной модели такое отклонение можно считать удовлетворительным.

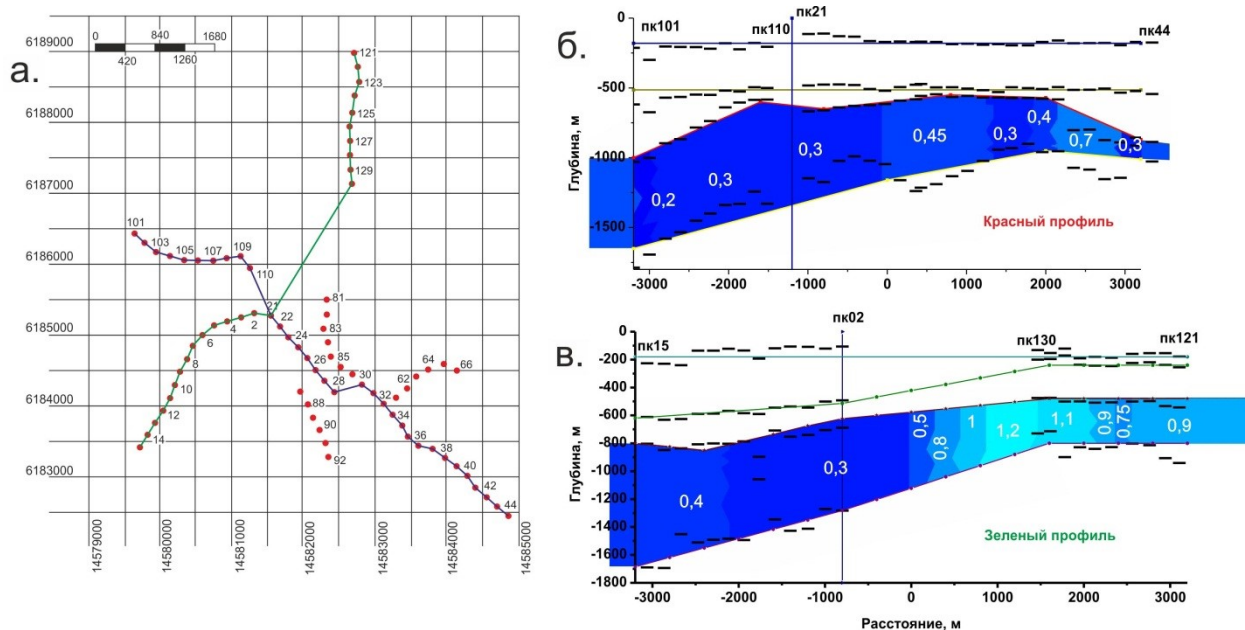


Рисунок 5. Схема измерений (а), с нанесенными профилями для трехмерного моделирования. б. и в. – сечения целевого слоя трехмерной геоэлектрической модели по приведенным профилям (цифрами обозначено удельное электрическое сопротивление в Ом, линии с символами – границы трехмерной модели, черные отрезки – одномерная модель)

Таким образом можно сделать следующие выводы:

Проведенное моделирование позволяет говорить об эффективности программы Modem3D в качестве средства для моделирования нестационарного электромагнитного сигнала. В результате такого моделирования появляется возможность дать положительное заключение об использовании той или иной установки для конкретной геологической ситуации (в данном случае – соляно-купольные структуры), и дать методические рекомендации, позволяющие повысить геолого-геофизическую информативность и качество импульсных электромагнитных зондирований.

Также, пример интерпретации данных полученных на Барабинско-Пихтовской моноклинали, Пихтовская интрузия (Новосибирская область) дает основания создать современное средство для интерпретации данных с использованием программы Modem3D и современных алгоритмов инверсии данных

Авторы выражают благодарность Кремеру И.А и Иванову М.И. за предоставление и обучение работе на программе Modem3D. Также необходимо отметить помощь сотрудников ИНГГ СО РАН в использование GRID среды института: А.С. Мартыанов, Д.В. Тейтельбаум, А. А. Власов.

Литература

1. Иванов М.И., Катешов В.А., Кремер И.А., Эпов М.И. Программное обеспечение модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института – 2009. – Т. 183. – С. 242 – 245.
2. Мартыянов 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 // Материалы Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т.2 / Старооскольский филиал ФГЮОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица». – Старый Оскол, – 2013. – с. 99-104.
4. C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering 79(11), pp. 1309-1331, 2009.
5. Кротевич Н.Ф. Влияние резких геоэлектрических неоднородностей на КПК геомагнитного поля [Текст] / Н.Ф. Кротевич, Л.Л. Ваньян // Геомагнитные исследования. – М. – 1967. – С.36-39.