

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ ОДНОМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КРУТОПАДАЮЩИХ ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОРУДНОЙ ЗОНЫ В ПРИОЛЬХОНЬЕ)

Шеин А.Н., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Численное моделирование показало, что при одномерной интерпретации данных зондирования становлением поля (ЗСБ), измеренных в присутствии набора крутопадающих проводящих пластов, которые находятся в менее проводящей среде, «получается» геоэлектрическая модель в виде полого залегающих пластов. В работе рассматривается изменение переходных характеристик в зависимости от параметров пластов (сопротивление, вертикальная мощность и толщина), а также обсуждаются результаты одномерной интерпретации квазиэкспериментальных данных, рассчитанных с помощью программы Modem3D.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, зондирование становлением поля, инверсия, Приольхонье.

В настоящее время в разработке программных средств для трёхмерного моделирования нестационарных электромагнитных полей достигнуты большие успехи. Одной из современных программ для таких расчетов является Modem3D [1] (И.А. Кремер, М.И., Иванов). Программа позволяет выполнять расчеты векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной сетке. Тестирование программы показало, что для широкого класса моделей расчеты выполняются с высокой точностью [2]. С помощью программы Modem3D удалось решить некоторые интересные с точки зрения геологии задачи, связанные с расчетом индукционных переходных характеристик сложнопостроенных моделей. Так, расчеты с использованием программы Modem3D позволили объяснить противоречие между результатами ЗСБ и съемками методом естественного поля (ЕП) при изучении Чернорудной зоны Приольхонья. Ранее профилирование методом ЕП показало, что в Чернорудной зоне присутствуют крутопадающие электронно-проводящие пласты, в совокупности с вмещающей средой образующие природный гальванический элемент – геобатарею. Однако согласно результатам одномерной инверсии данных ЗСБ на глубинах 100 – 400 м здесь присутствует пологая проводящая зона [3]. Это противоречие оказалось кажущимся: к «появлению» на геоэлектрическом разрезе пологих проводящих структур приводит одномерная (1D) инверсия данных ЗСБ, рассчитанных с помощью программы Modem3D для модели в виде пакета крутопадающих проводящих пластов [4]. В данной работе обсуждаются результаты исследований, которые направлены на более полное изучение проблемы, связанной с «трансформацией» вертикальных проводящих пластов в субгоризонтальные.

Исходная модель геобатареи, которая использовалась для сравнения с измененными, представлена на рис. 1. Модель включает пакет из 12 вертикальных проводящих пластин, расположенных в слабо проводящей вмещающей среде с удельным сопротивлением 100 Ом·м.

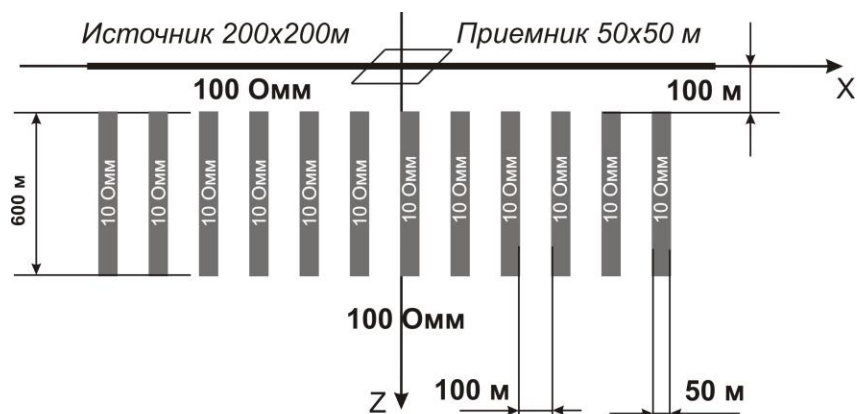


Рис. 1. Модель геобатареи в виде пакета из 12 вертикальных проводящих пластин, расположенных в слабопроводящем полупространстве.

Толщина каждой пластины составляет 50 м, вертикальная мощность – 600 м, глубина залегания верхней кромки – 100 м, удельное электрическое сопротивление – 10 Ом·м, расстояние между соседними пластинами – 100 м.

Для возбуждения индукционных переходных процессов используется соосная установка с генераторной петлей размером 200 м × 200 м и приемной – 50 м × 50 м. Шаг наблюдений по профилю (расстояние между центрами соседних установок) равен 50 м. Всего расчет переходных характеристик с помощью программы Modem3D проведен для 23 положений установки, которая перемещалась от центра модели (X=0) и выходила за пределы пакета проводящих пластов на расстояние 300 м (X=±1100 м).

После того, как были рассчитаны переходные характеристики, с помощью программы Inv\_QQ [5] (Антонов Е.Ю., Корсаков М.А.) была выполнена их инверсия в рамках одномерной модели. Качество подбора оценивалось с помощью среднеквадратического отклонения (СКО)

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{f^{экс}(t_i) - f^{мод}(t_i)}{\varepsilon_i f^{экс}(t_i)} \right]^2}$$

Здесь N – количество времен; i – номер временной задержки;  $t_i$  – времена;  $f^{экс}(t_i)$  – псевдоэкспериментальные (полученные в результате трехмерного моделирования) данные;  $f^{мод}(t_i)$  – данные, рассчитанные для модели, найденной путем 1D инверсии псевдоэкспериментальных переходных характеристик;  $\varepsilon_i$  – относительная ошибка измерения. СКО для всех кривых становления не превышало 1-3%. По результатам 1D инверсии псевдоэкспериментальных данных построен геоэлектрический разрез (рис. 2а), на котором выделяются три зоны: 1) явного влияния пачки вертикальных проводящих пластов (до X=±300–400м); 2) переходная (X от 400 м до 900 м); 3) вмещающая среда (X>900 м)

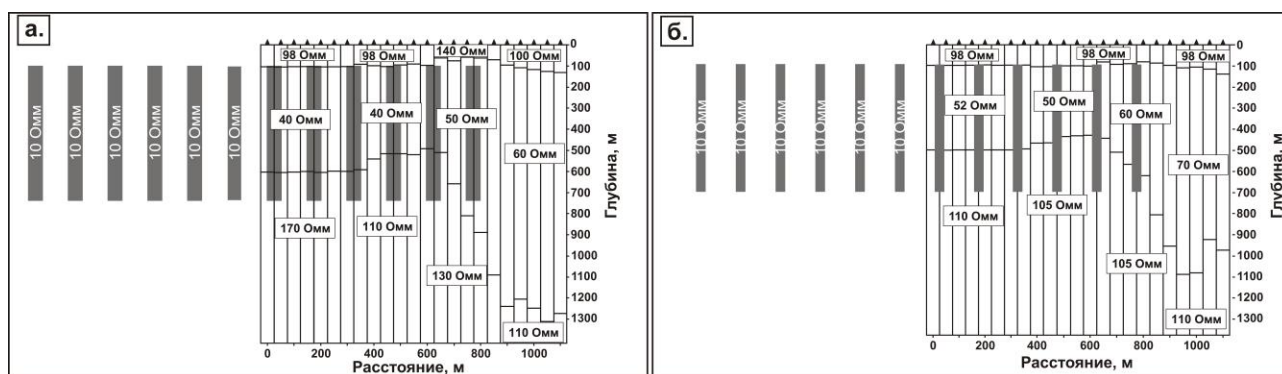


Рис. 2а. Одномерный геоэлектрический разрез и исходная модель геобатареи; б. подобранный геоэлектрический разрез и модель измененной геобатареи (толщины вертикальных пластов уменьшены с 50 м до 30 м)

На следующем этапе численного эксперимента расчеты были выполнены для моделей, параметры которых отличались от исходной (варьировались сопротивление, вертикальная мощность и толщина проводящих пластов). После этого выполнялась 1D инверсия и строились геоэлектрические разрезы. Первый параметр, который был изменен, – толщина проводящих пластин. Вместо 50 м мы сделали 30 м (рис. 2б). Полученные синтетические данные проинтерпретированы в рамках 1D модели. Геоэлектрический разрез в этом случае похож на полученный ранее для исходной модели: существует зона явного влияния пачки вертикальных проводящих пластов (до X=±300–400м), переходная зона (X от 400 м до 900 м) и область вмещающей среды (X>900 м).

В контексте данной статьи наибольший интерес представляет зона явного влияния пачки проводящих пластов. Прежде всего, отметим различия в геоэлектрических разрезах, полученных для исходной и измененной моделей (рис. 2б). Во-первых, 1D геоэлектрический разрез в пределах проводящей зоны стал менее контрастным: если для исходной модели сопротивления составляли:  $\rho_1=100$  Ом·м,  $\rho_2=40$  Ом·м,  $\rho_3=170$  Ом·м, то для измененной –  $\rho_1=100$  Ом·м,  $\rho_2=50$  Ом·м,  $\rho_3=110$  Ом·м. Во-вторых, нижняя граница горизонтальной проводящей зоны располагается на глубине, которая на

200–220 м меньше глубины залегания нижней кромки вертикальных проводящих пластов. Ранее разница глубин составляла 100–120 м. Таким образом, при уменьшении толщины пластин сопротивление «фиктивного» проводящего слоя и его мощность возрастают.

На следующем этапе мы уменьшили на 20% вертикальную мощность пластов (480 м вместо 600 м). Полученный геоэлектрический разрез отличается от исходного: теперь нижняя граница субгоризонтального проводящего пласта располагается на 200–220 м выше нижней кромки вертикальных пластин. Таким образом, уменьшение вертикальных размеров проводящих пластов приводит к снижению мощности кажущейся пологой проводящей структуры. Контраст по сопротивлениям при этом сохраняется.

Затем были рассчитаны сигналы для моделей с изменённым сопротивлением вертикальных пластин. Сначала на 20% уменьшили сопротивление пластов (8 Ом·м вместо 10 Ом·м). При этом контраст сопротивлений субгоризонтального проводящего слоя с остальными несущественно возрастает по сравнению с тем случаем, когда 1D разрез построен для исходной модели. Так,  $\rho_2$  понизилось до 35 Ом·м вместо 40 Ом·м. При увеличении сопротивления пластов с 10 до 20 Ом·м контраст сопротивлений, соответственно, уменьшится.

Изменение сопротивления вертикальных пластов не влияет на положение нижней границы субгоризонтальной проводящей зоны (изменения не превышают 20–50 м). Это может быть следствием влияния на процесс интерпретации того факта, что интерпретатор располагал априорной информацией о структуре Чернорудской зоны либо представляет собой объективный факт, который требует более детального рассмотрения.

Отметим, что чем больше контраст сопротивлений, тем хуже подбирается трехмерная синтетическая кривая в рамках горизонтально-слоистой модели среды.

Помимо описанных выше численных экспериментов в некоторых точках профиля был проведен расчет переходных характеристик для крестовой установки (рис. 3а). Эти расчеты были проведены для того, чтобы выяснить, возможно ли с помощью такой установки оценить простираемость вертикальных пластов. На рисунке 3(б,в) приведены отклонения сигналов в вынесенных приемниках по сравнению с сигналом в центральном приемнике. Показаны отклонения для установок, расположенных в точке  $X=0$  и  $X=700$  м профиля.

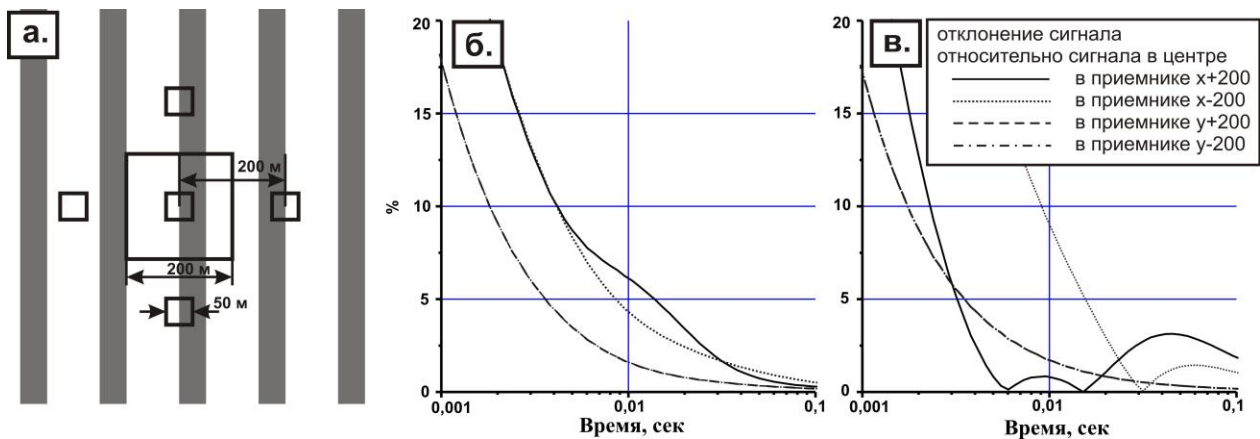


Рис. 3. Схема крестовой установки (а) и отклонение сигналов, рассчитанных в вынесенных приемниках относительно сигнала в центральном для установок в точках  $X=0$  и  $X=700$  м на профиле

На рис. 3б, в видно, что отклонения, рассчитанные для пары приемников, которые расположены вдоль линии простираемости (пунктирная и штрих-пунктирная кривые, рис. 3б,в), совпадают. Что касается приемников расположенных вкrest простираемости пластин (сплошная и точечная кривые, рис. 3б,в), они, во-первых, расходятся, и, во-вторых их отклонения относительно центрального положения больше, чем для продольных приемников. Таким образом, направление простираемости вертикальных проводящих пластин можно оценить следующим способом: воспользоваться совпадающими кривыми для приемников вдоль простираемости проводящих пластин и, вращая крестовую установку, найти минимальное отклонение между сигналами от вынесенных установок. Отметим также, что приемники ориентированные вкrest простираемости, могут дать информацию о контрастности среды: чем разница сигналов в центральном и вынесенном приемнике, тем контрастней среда.

Выводы:

- При уменьшении толщины проводящих пластин увеличиваются сопротивление и мощность фиктивного проводящего слоя;
- Снижение мощности вертикальных проводящих пластов, приводит к уменьшению мощности фиктивной пологой проводящей структуры;
- При увеличении контраста сопротивлений вмещающей среды и пластин усиливается контраст сопротивлений между фиктивным проводящим слоем и остальными слоями 1D разреза.
- Сигналы вынесенных приемников крестовой установки различаются в зависимости от азимута разнесенной установки. Этот факт можно использовать для определения направления простирания вертикальных проводящих пластин.

Работа выполнена при поддержке соглашения № 14.В37.21.0615 от 16.08.2012 по теме «Разработка и практическое применение эффективных программно-алгоритмических средств для моделирования нестационарных электромагнитных полей в трехмерных проводящих и поляризующихся геологических средах», а также проекта «Геофизические поля Приольхонья и их тектоническая интерпретация» в рамках программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 7 «Физические поля и внутреннее строение Земли».

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

1. Иванов М.И. Программное обеспечение Modem3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации [Текст] / М.И. Иванов, В.А. Катешов, И.А. Кремер, М.И. Эпов // Записки Горного института – 2009. – Т. 183. – С. 242 – 245.
2. Шеин А.Н. Программа Modem3D для расчета нестационарных электромагнитных полей в сложных трехмерных средах / А.Н. Шеин, Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников, И.А. Кремер, М.И. Иванов // Сборник материалов второй международной конференции «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем», 1-4 октября 2012 г., Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина. – С. 104.
3. Кожевников Н.О. Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований [Текст] / Н.О. Кожевников, Ю. Бигалке, О.К. Кожевников // Геология и геофизика. – 2004. – т. 45. – №2 – с. 253–265.
4. Шеин А.Н. Трехмерная геоэлектрическая модель Чернорудной зоны Приольхонья: описание и результаты расчетов индукционных переходных характеристик с помощью программы Modem3D [Текст] / А.Н. Шеин, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр., 15-26 апреля 2013 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 3 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 18-23
5. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. «ТЕМ-IP» - система интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред [электронный ресурс] // Международная научно-практическая конференция Электромагнитные методы исследований-2010. (Иркутск, 15-20 августа 2010 г.). – 2010. – 2 с. – 1 электрон. опг. диск (CD-ROM).