

## **ТРЕХМЕРНАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЧЕРНОРУДНОЙ ЗОНЫ ПРИОЛЬХОНЬЯ: ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MODEM3D**

*Александр Николаевич Шейн*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383) 330-41-22  
e-mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

*Николай Олегович Кожевников*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики, тел. (383) 333-28-16  
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

*Евгений Юрьевич Антонов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3, заведующий лаборатории геоэлектрики, тел. (383) 333-28-16  
e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

В работе рассматривается геоэлектрическая модель Чернорудной зоны в Приольхонье. Модель позволяет объяснить противоречие между результатами одномерной инверсии данных зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и данными геологии вместе с измерениями методом естественного электрического поля (ЕП). Как показало численное моделирование, при одномерной интерпретации данных ЗСБ, измеренных в присутствии набора крутопадающих проводящих пластов, которые находятся в менее проводящей среде, «получается» геоэлектрическая модель в виде полого залегающих пластов. Показано, что программный комплекс Modem3D позволяет проводить расчеты нестационарного электромагнитного поля в присутствии геологических объектов сложного строения.

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

## **3D GEOELECTRICAL MODEL OF CHERNORUD AREA IN OL'KHON REGION: DESCRIPTION AND RESULTS OF MODELING TRANSIENT INDUCTION SIGNALS BY PROGRAM MODEM3D**

*Alexandr N. Shein*

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

*Nickolay O. Kozhevnikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 3, Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, Research Scientist, tel. (383) 333-28-16,  
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

*Evgeniy Yu. Antonov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 3, Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, Research Scientist, tel. (383) 333-28-16,  
e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper presents the geoelectrical model of the Chernorud zone in Ol'khon region. The model explains the contradiction between the results of 1D TEM - data inversion and both geology together and SP surveys. 1D inversion of TEM-data measured over a set of steeply dipping conductive layers imbedded in a poorly conductive medium results in a geoelectric section consisting of a set of gently sloping layers. This fact was proved by numerical simulation. It was shown that software system Modem3D allows accurate calculating transient electromagnetic field in the presence of geological targets of complex structure.

**Key words:** mathematic modeling, transient electromagnetic sounding, inversion, Ol'khon region.

Хотя в последние два десятилетия в России и за рубежом достигнут большой прогресс в разработке программных средств для трёхмерного моделирования нестационарных электромагнитных полей, на практике все еще используют преимущественно одномерное моделирование и инверсию данных импульсной индуктивной электроразведки. Нередко это приводит к большим, а иногда и недопустимым погрешностям оценки возможностей и интерпретации результатов нестационарных электромагнитных зондирований. Ситуация может быть кардинально улучшена за счет применения современной программы для расчета нестационарных электромагнитных полей в трёхмерных проводящих и поляризующихся средах – Modem3D (авторы Кремер И.А, Иванов М.И.). Расчеты выполняются векторным методом конечных элементов на неструктурированной трехмерной тетраэдральной сетке. Тестирование программы показало, что для широкого класса моделей расчеты выполняются с высокой точностью (Шейн А.Н. и др., 2012).

В данной статье обсуждаются результаты 3D моделирования индукционных переходных характеристик применительно к проблемам, связанным с применением метода ЗСБ в Приольхонье. Хотя геофизические и, в частности, геоэлектрические исследования проводят здесь на протяжении свыше 30 лет (Кожевников и др., 2004, 2008), вследствие сложного геологического строения этого региона интерпретация электроразведочных съемок в рамках 1D модели наталкивается на значительные трудности. Поэтому Приольхонье является благоприятным объектом для оценки возможностей программы Modem3D при решении сложных геологических проблем.

Как известно, региональная структура Приольхонья носит двумерный характер (Кожевников и др., 2004, 2008). В этой связи может возникнуть вопрос: почему для расчета индукционных переходных процессов используется программа 3D, а не 2D моделирования? Дело в том, что двумерный характер геоэлектрической модели Приольхонья в явном виде проявляется, если распределение удельного электрического сопротивления выражается в декартовых координатах. Поскольку распределение сопротивления не является осесимметричным, невозможно использовать осевую симметрию источника (горизонтальной незаземленной петли) для того, чтобы сформулировать и решать задачу в двумерной постановке.

Работы методом ЕП, выполненные в Приольхонье, показали, что Чернорудская зона выделяется отрицательной аномалией потенциала шириной 0.5 – 2 км и амплитудой от 0.4 до 1В. Это свидетельствует о том, что ЕП

генерируется геобатареей, неотъемлемыми элементами которой являются крутопадающие проводящие пласты. Однако согласно одномерной инверсии данных ЗСБ в разрезе присутствуют пологая проводящая зона, кровля которой залегает на глубинах 100 – 400 м. По данным ЗСБ с мощным источником вертикальная мощность зоны изменяется в пределах 250 – 900 м, а суммарная продольная проводимость – от 25 до 300 См. Таким образом, результаты ЗСБ противоречат данным съемок методом ЕП и тому факту, что геологические структуры Приольхонья характеризуются крутым падением. Это послужило основанием для ревизии геоэлектрической модели с тем, чтобы она согласовывалась с данными геологии и съемок методом ЕП.

На рис. 1 показана геоэлектрическая модель Чернорудской зоны в виде пакета из 12 вертикальных проводящих пластин, расположенных в слабо проводящей вмещающей среде – однородном полупространстве с удельным сопротивлением 100 Ом·м. 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.

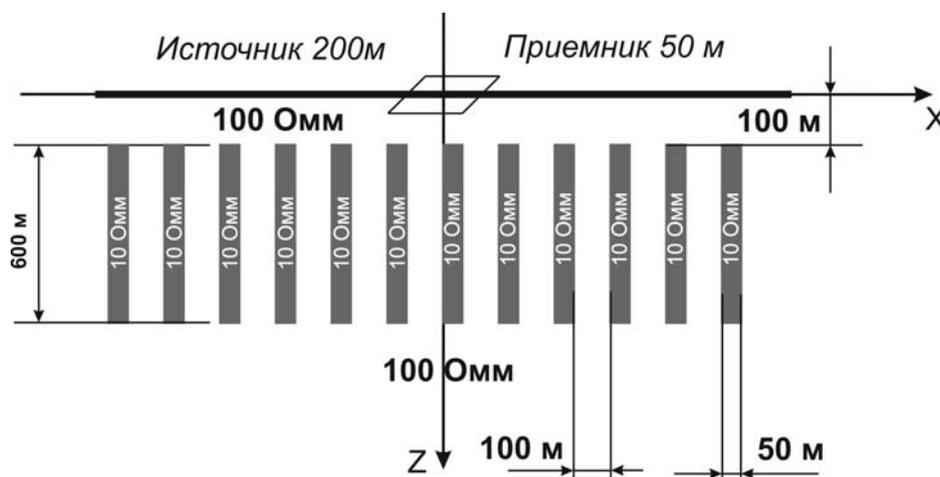


Рисунок 1 Геоэлектрическая модель Чернорудской зоны Приольхонья в виде пакета из 12 вертикальных проводящих пластин, расположенных в слабопроводящем однородном полупространстве.

Для возбуждения индукционных переходных процессов используется соосная установка с генераторной петлей размером 200 м × 200 м и приемной – 50 м × 50 м. Именно такие установки чаще всего применялись при изучении Чернорудской зоны [Кожевников и др., 2004]. Шаг наблюдений по профилю (расстояние между центрами соседних установок) равен 50 м, что обеспечивает необходимую детальность исследований. Всего расчет переходных характеристик с помощью программы Modem3D был проведен для 23 положений установки, которая перемещалась от центра модели ( $X=0$ ) и выходила за ее пределы на 300 м ( $X=\pm 1100$  м).

После того, как были рассчитаны переходные характеристики, с помощью программы Inv\_QQ (авторы Антонов Е.Ю., Корсаков М.А.) была выполнена их инверсия в рамках одномерной модели. Качество интерпретации данных зондирования оценивалось с помощью среднеквадратического отклонения:

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

Здесь  $N$  – количество времен,  $t_i$  – времена,  $f^{ЭКC}(t_i)$  – псевдоэкспериментальные (полученные в результате трехмерного моделирования) данные,  $f^{мод}(t_i)$  – модельные (рассчитанные для 1D модели) данные,  $\varepsilon_i$  – относительная ошибка измерения. СКО для всех кривых становления не превышало 0,01-0,03. На рис. 2а приведены псевдоэкспериментальная и модельная кривые кажущегося удельного сопротивления для установки, расположенной на расстоянии 300 м от центра модели. Как нетрудно видеть, на ранних ( $t < 10$  мс) временах удается подобрать одномерную модель, переходная характеристика для которой хорошо «вписывается» в псевдоэкспериментальные данные. Однако на поздних ( $t > 10$  мс) временах 3D-эффекты настолько значительны, что модельная переходная характеристика явно отличается от псевдоэкспериментальной.

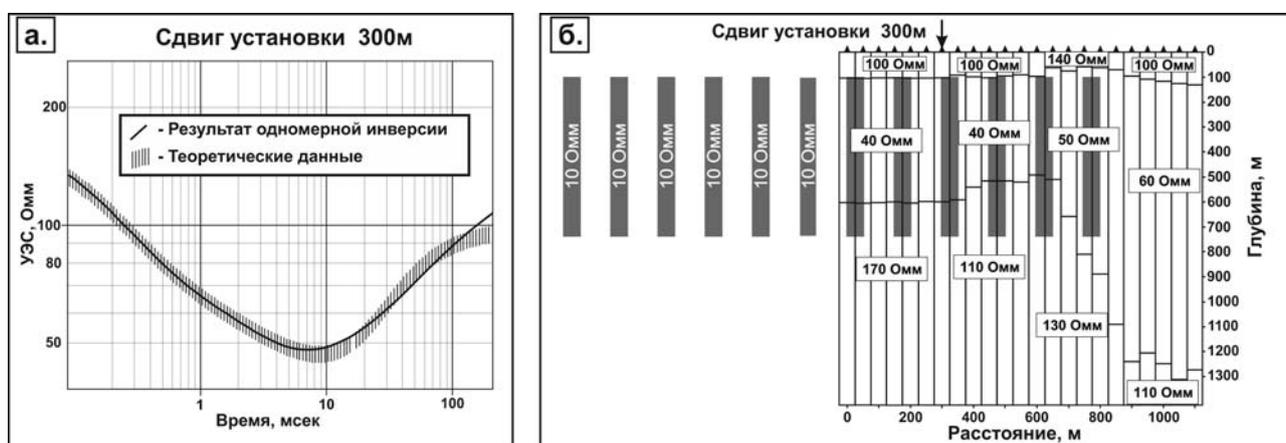


Рисунок 2 а. Теоретическая кривая становления, полученная программой Modem3D (вертикальные линии); подобранная кривая становления программой для одномерной интерпретации Inv\_QQ; б. Одномерный, подобранный программой Inv\_QQ геоэлектрический разрез и схематическая модель Чернорудской зоны Приольхонья.

По результатам инверсии всех псевдоэкспериментальных данных был построен геоэлектрический разрез (рис. 2б), на котором выделяются три зоны: 1) явного влияния пачки вертикальных проводящих пластов (до  $X = \pm 300-400$  м); 2) переходная; 3) вмещающая среда.

Особый интерес в контексте настоящей статьи представляет первая, центральная зона. Как нетрудно видеть, в результатах одномерной инверсии пачка вертикальных проводящих пластов проявляется как горизонтально-слоистая (трехслойная) среда с параметрами:  $\rho_1=100$ ,  $\rho_2=40$ ,  $\rho_3=170$ ;  $h_1=100$ ,  $h_2=470$ . Сравнение исходной модели с построенной по данным одномерной инверсии, показывает, что глубина залегания верхней кромки проводящих пластов практически совпадает с кровлей проводящей зоны, найденной путем инверсии псевдоэкспериментальных данных в рамках 1D модели. Нижняя граница горизонтальной проводящей зоны располагается на глубине, которая на 100–120 м меньше глубины залегания нижней кромки вертикальных проводящих пластов.

Переходная зона 2 начинается там, где ослабевает влияние пачки вертикальных проводящих пластов. При удалении от центра профиля инверсия в рамках 1D модели дает неустойчивые, изменчивые результаты, при этом влияние проводящей пачки, хотя и ослабевает по мере продвижению к флангам профиля (зона 3), остается заметным даже на максимальном удалении от центра проводящей пачки.

## ВЫВОДЫ

Инверсия данных ЗСБ, измеренных в присутствии набора крутопадающих проводящих пластов, в рамках модели одномерной горизонтально-слоистой среды приводит к «появлению» на геоэлектрическом разрезе пологих проводящих структур.

При изучении структуры Приольхонья этот факт позволяет объяснить противоречие между результатами нестационарных электромагнитных зондирований, с одной стороны, и других геолого-геофизических исследований, с другой. Однако для окончательного решения данной проблемы необходимы дополнительные исследования.

Программный комплекс Modem3D позволяет выполнять расчеты индукционных переходных характеристик сложно-построенных геоэлектрических моделей.

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».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Кожевников Н.О. Структура Приольхонья и Приморского разлома по геофизическим данным [Текст] / Н.О. Кожевников, Ю.А. Агафонов, Е.Ю. Антонов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции в 2-х томах. Т.2. – М.: ИФЗ. 2008, с. 40 – 42.
3. 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.
4. 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.