

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»  
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

X Международные научный конгресс и выставка

## ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

**НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.  
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,  
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ГЕОЭКОЛОГИЯ**

Т. 3

Сборник материалов

Новосибирск  
СГГА  
2014

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН,  
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск  
*М. И. Эпов*

Доктор геолого-минералогических наук, академик,  
председатель Президиума Кемеровского научного центра СО РАН, Кемерово  
*А. Э. Конторович*

Академик РАН, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск  
*М. В. Курленя*

Кандидат геолого-минералогических наук,  
генеральный директор ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск  
*А. С. Ефимов*

Руководитель Регионального агентства по недропользованию  
по Сибирскому федеральному округу, Новосибирск  
*А. И. Неволько*

Профессор, проректор по научной  
и инновационной деятельности СГГА, Новосибирск  
*В. А. Середович*

Кандидат геолого-минералогических наук,  
учёный секретарь ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск  
*С. П. Зайцев*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 209 с.

ISBN 978-5-87693-712-4 (т. 3)

ISBN 978-5-87693-698-1

ISBN 978-5-87693-697-4

В сборнике опубликованы материалы X Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014», представленные на Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 622

ISBN 978-5-87693-712-4 (т. 3)

ISBN 978-5-87693-698-1

ISBN 978-5-87693-697-4

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MODEM3D**

*Александр Николаевич Шейн*

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

В работе обсуждаются результаты 3D моделирования индукционных переходных характеристик незаземленной петли над трубчатыми кимберлитовыми объектами с помощью программы Modem3D. При поисках таких объектов потенциально достижимая эффективность методом переходных процессов оказалась ниже ожидаемой. Моделирование позволило показать, что в условиях Якутской алмазонасной провинции шансы обнаружить с помощью метода переходных процессов кимберлитовые трубки есть только при наличии околотрубчатых изменений в виде тонкой проводящей оболочки.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, зондирование становлением поля, кимберлитовая трубка.

## **MODELING TRANSIENT INDUCTION RESPONSE TO KIMBERLITE PIPE USING PROGRAM MODEM3D**

*Alexandr N. Shein*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., PhD, 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, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, Main 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, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Doctor of Physico-mathematical Sciences, Head of laboratory, tel. (383)333-28-16, e-mail: AntonovEY@ipgg.sbras.ru

The paper presents the results of 3D modelling of transient induction responses to kimberlite pipe using program Modem3D. In the search for such objects efficiency of the TEM method is low-

er than expected. Detection of kimberlite pipes in Yakutiya diamond province with the TEM method is practically possible only in the case that a pipe is surrounded by a thin conductive envelope.

**Key words:** mathematic modeling, transient electromagnetic sounding, inversion, kimberlite pipe.

В настоящее время при интерпретации данных зондирований методом переходных процессов (ЗМПП) чаще всего ограничиваются отысканием одномерной (горизонтально-слоистой) модели проводящей геологической среды. Однако зачастую при таком подходе эффективность еще остается ниже потенциально достижимой. Ситуация может быть кардинально улучшена путем проведения трехмерного моделирования с использованием современных программ.

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]. 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 уже удалось решить некоторые интересные с точки зрения геологии задачи, связанные с расчетом индукционных переходных характеристик сложнопостроенных моделей. Одна из таких задач заключалась в объяснении кажущегося противоречия между результатами ЗМПП и съемками методом естественного поля (ЕП) при изучении Чернорудской зоны Приольхонья [3]. Существует много других интересных объектов, при изучении которых можно рассчитывать на значительное продвижение за счет постановки трехмерного моделирования. Среди таких объектов наше внимание привлекли кимберлитовые трубки западной Якутии. В этом районе трубки подверглись эрозии, после чего были перекрыты толщами вулканогенных и/или осадочных пород большой мощности. Для обнаружения таких трубок необходимо использовать подходы, основанные на «нюансах» геоэлектрических моделей, таких как изменения удельного электрического сопротивления пород в околотрубочном пространстве и др. Иными словами, необходимо ориентироваться на эффекты «второго порядка», которые могут быть выявлены и практически использованы только на основе трёхмерного математического моделирования. В данной работе обсуждаются результаты 3D моделирования индукционных переходных характеристик над кимберлитовыми трубками, которые в первом приближении могут быть аппроксимированы субвертикальными телами цилиндрической формы.

На первом этапе при моделировании нестационарного сигнала с помощью программы Modem3D над трубчатыми объектами было проведено тестирование расчетной сетки путем сравнения с одномерными расчётами. Прежде всего было выполнено сравнение с результатами расчетов с использованием программы UnvQQ (авторы Антонов Е.Ю., Эпов М.И.), которая позволяет моделировать нестационарный электромагнитный сигнал в горизонтально-слоистых однород-

ных проводящих средах. Другим необходимым тестом была проверка достаточности расчетной области. Показано, что совпадение с результатами одномерного расчета хорошее (ошибка не превышает 2%), а сетка достаточна.

После предварительного тестирования была сформирована модель поискового объекта в виде усеченного конуса. Вмещающая среда представлена двухслойной одномерной моделью с параметрами:  $h_1 = 100$  м,  $\rho_1 = 100$  Ом·м,  $\rho_2 = 2000$  Ом·м. Кимберлитовая трубка с удельным сопротивлением 300 Ом·м имеет верхний радиус 500 м, нижний – 460 м, вертикальную мощность 200 м, эпицентр трубки совпадает с началом системы координат. Для моделирования использовалась соосная петлевая установка: источник 200 м x 200 м, приемник 50 м x 50 м. Расчеты выполнялись для установки в центре координат, после чего проводилось сравнение с переходной характеристикой вмещающей горизонтально-слоистой среды, рассчитанной с помощью программы UnvQQ. Как выяснилось, сигналы отличаются менее, чем на 5% (рис. 1, сплошная кривая). Такая аномалия недостаточна для обнаружения кимберлитовой трубки. Поэтому была предпринята попытка выяснить, насколько нужно изменить сопротивление трубки, чтобы она могла быть уверенно обнаружена методом переходных процессов. Для этого ее удельное сопротивление понижалось с 300 Ом·м до 200 Ом·м (рис. 1, пунктирная кривая), а затем до 100 Ом·м (рис. 1, точечная кривая). Графики отклонений представлены на рис. 1 (относительные отклонения сигналов, вычисленных программой Modem3D и UnvQQ). Как нетрудно видеть, максимальное отклонение (14%) наблюдается над центром трубки с сопротивлением 100 Ом·м (рис. 1, точечная кривая).

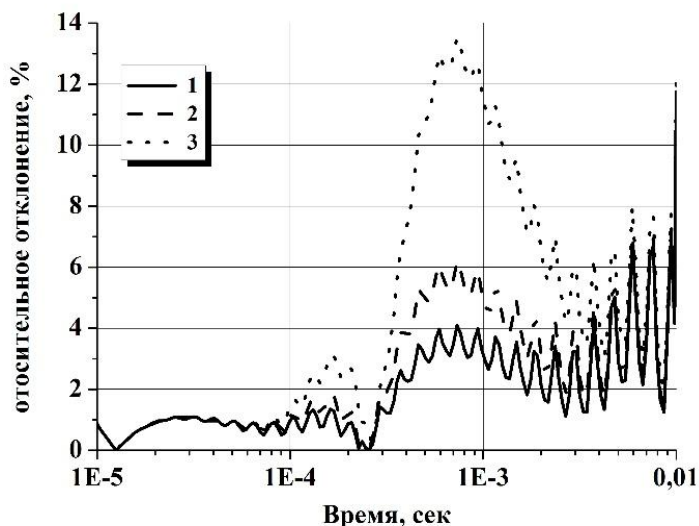


Рис. 1. Относительные отклонения сигналов, найденных путем одномерного (программа UnvQQ) и трехмерного расчетов (программа Modem3D). Шифр кривых – значение сопротивления трубки: 1 – 300 Ом·м, 2 – 200 Ом·м, 3 – 100 Ом·м

По литературным данным такой контраст между сопротивлениями трубки и вмещающей среды (100 Ом·м и 2000 Ом·м) маловероятен. При меньшем контрасте (300 Ом·м на фоне 2000 Ом·м) максимальная относительная аномалия значение не превышает 4% (рис. 1, сплошная кривая). Таким образом, можно сделать вывод, что трубку с рассмотренными параметрами выявить практически невозможно.

Следующий этап заключался в построении модели трубки с тонкой проводящей оболочкой или обрамлением («стакан» без дна, рис. 2). Толщина оболочки усеченного конуса составляла 20 м. Ее сопротивление варьировалось (5, 10, 20 Ом·м).

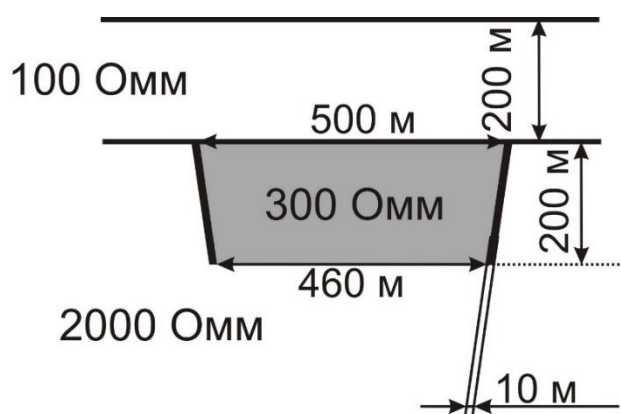


Рис. 2. Проекция на плоскость XZ модели кимберлитовой трубки с проводящей «оболочкой»

После вычисления переходных характеристик для модели трубки с разными сопротивлениями оболочек, как и в предыдущих случаях, вычислялось отклонение сигнала по отношению к рассчитанному для вмещающей горизонтально-слоистой среды (с использованием программы UnvQQ). На рисунке 3 представлены отклонения трехмерных сигналов от одномерных над моделью трубки с оболочкой. Как можно видеть, проводящая оболочка увеличивает аномальную составляющую сигнала: аномальный эффект при сопротивлении оболочки 5 Ом·м достигает 100%, при 10 Ом·м уменьшается до 40% и при 20 Ом·м - до 20%. Таким образом, трубка с проводящей оболочкой может быть обнаружена методом переходных процессов.

После этого модель с оболочкой толщиной 20 м и сопротивлением 20 Ом·м была изменена таким образом, что проводимость оболочки осталась неизменной, однако при этом ее толщина и удельное сопротивление уменьшились до 10м 10 Ом·м, соответственно. Предполагалось, что такая модель, во-первых, позволит еще раз независимым образом убедиться в правильности расчета программой Modem3D – сигналы для эквивалентных моделей должны совпасть. Во-вторых, подобная модель более соответствует реальности, так как по литературным источникам, если и возможно в каком-то виде обрамление трубки

проводящим слоем, то его толщина едва ли превышает первые метры [4]. Расчеты подтвердили ожидания: относительные ошибки совпали для одинаковых продольных проводимостей.

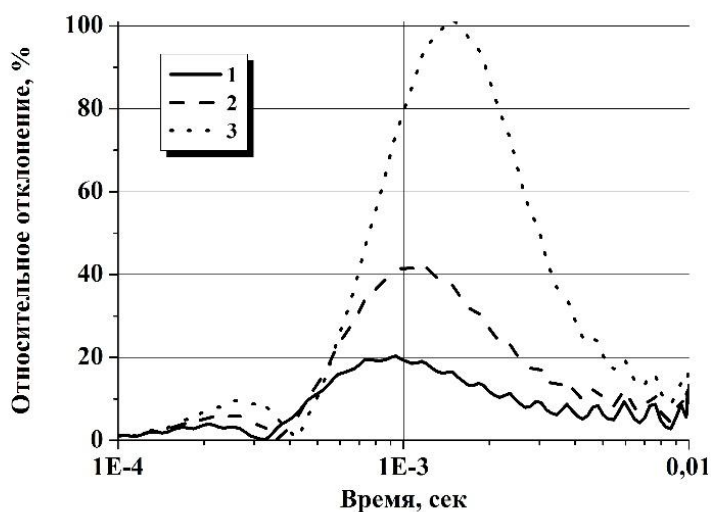


Рис. 3. Относительные отклонения сигналов, найденных путем одномерного (программа UnvQQ) и трехмерного расчетов (программа Modem3D). Шифр кривых – сопротивление оболочки трубки: 1 – 20 Ом, 2 – 10 Ом, 3 – 5 Ом

Помимо приведенных тестов, были проведены расчеты для выявления чувствительности к разным параметрам модели кимберлитовой трубки как высота оболочки, ее сопротивление, вертикальная мощность трубки и т.д.

#### Выводы

Результаты расчетов показали, что в условиях Якутской алмазоносной провинции практически нет шансов обнаружить с помощью метода переходных процессов кимберлитовые трубки без околотрубочных изменений.

При наличии околотрубочных изменений в виде тонкой оболочки с проводимостью порядка 1 См над кимберлитовыми телами наблюдаются аномальные переходные характеристики. Величина аномалии достаточна для ее уверенного выделения на фоне геологических помех, типичных для кимберлитовых полей Западной Якутии.

Эффективность программы Modem3D по результатам тестирования и многовариантных расчетов оценивается как высокая.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. 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 «Кирилица». – Старый Оскол, – 2013. –с. 99-104.

3. Шеин А.Н., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Исследование возможностей и ограничений одномерной инверсии данных зондирования становлением при изучении крутопадающих проводящих структур (на примере чернорудной зоны в Приольхонье) [электронный ресурс] // Материалы VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013. URL: [http://emf.ru/ems2013/section1/Шеин\\_Кожевников\\_Антонов.pdf](http://emf.ru/ems2013/section1/Шеин_Кожевников_Антонов.pdf) (дата обращения 10.10.2013)

4. Коротков Ю.В. Поиск скрытых кимберлитовых тел с использованием импульсной индуктивной электроразведки в Архангельской алмазонасной провинции: автореф. дис. канд.: 25.00.10. – Архангельск, 2011. – 26 с.

© А. Н. Шеин, Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, 2014