

## **ДВУМЕРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА ВБЛИЗИ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПЛАСТА ИЛИ РАЗЛОМА**

*Дмитрий Юрьевич Кушнир*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, научный сотрудник, тел. (383) 32-94-43 (доб. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

*Глеб Владимирович Дятлов*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

*Александр Игоревич Макаров*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доб. 152), e-mail: Alexanderi.Makarov@bakerhughes.com

*Юлий Александрович Дашевский*

Baker Hughes, Новосибирский технологический центр, 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, доктор физико-математических наук, директор, тел. (383)332-94-43 (доб. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

Во время бурения для оптимального расположения ствола скважины широко используются приборы электромагнитного каротажа. По данным, поступающим на поверхность, требуется оценить электромагнитные параметры среды, в которой находился прибор. Использование данных электромагнитного каротажа, особенно для интерпретации в реальном времени, обычно ограничивается локальным подбором одномерной слоистой модели среды на некотором интервале траектории скважины. На практике встречаются ситуации, в которых среда не может быть достаточно точно локально описана в рамках слоистой модели, например, в случае выклинивания пласта, субвертикального разлома, стратиграфического несогласия и др. Для интерпретации измерений приборов в таких сложных геологических структурах предлагается использовать двумерную модель среды с плоскими границами, параллельными оси простирания структуры.

В рамках двумерной геоэлектрической модели среды разработан комплекс программ для прямого моделирования измерений приборов электромагнитного каротажа, созданный на основе метода граничных интегральных уравнений. На базе прямого моделирования предложен алгоритм инверсии для определения параметров двумерной модели среды по данным электромагнитного каротажа. Ядром инверсии является метод поиска глобального минимума DIRECT. Работоспособность предложенного алгоритма инверсии продемонстрирована на синтетических данных приборов VisiTrak и AziTrak.

**Ключевые слова:** электромагнитный каротаж, интерпретация данных каротажа, двумерная геоэлектрической модель среды, ось простирания, геонавигация, метод глобальной оптимизации DIRECT, прибор AziTrak, прибор VisiTrak.

## 2D INVERSION-BASED INTERPRETATION OF SYNTHETIC RESISTIVITY DATA NEAR PINCHING-OUTS OR FAULTS

### *Dmitry Yu. Kushnir*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 139), e-mail: Dmitry.Kushnir@bakerhughes.com

### *Gleb V. Dyatlov*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 132), e-mail: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com

### *Alexander I. Makarov*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (ext. 152), e-mail: Alexanderi.Makarov@bakerhughes.com

### *Yuliy A. Dashevskiy*

Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, Kutateladze Str. 4a, Professor, Director, tel. (383)332-94-43 (ext. 102), e-mail: Yuliy.Dashevsky@bakerhughes.com

Resistivity tools are widely used while drilling for optimal well placement. Challenges, though, include processing the logging data and reconstructing the parameters of the formation around the tool. Usually, interpretation of the data comes to selection of the parameters of the 1D layered formation for which the simulated signals fit locally the measured data on a selected well-bore interval. However, in the field, more complex scenarios occur; for example, pinching-out of bed, sub-vertical faults, and unconformity. In these situations, there is no appropriate local 1D layered formation that quite fits the logging data. Therefore using locally a 2D formation model with plane boundaries parallel to some strike axis is recommended.

The software package was developed for forward simulation of the resistivity tool responses in the 2D geoelectrical formation model. Forward simulation is based on the method of boundary integral equations. An inversion algorithm was proposed for logging the data by varying the 2D formation parameters. The computational core of the inversion is the global minimum search algorithm DIRECT. The algorithm is substantiated using the synthetic logging data of the VisiTrak and AziTrak tools.

**Key words:** resistivity logging, logging data interpretation, 2D geoelectrical formation model, strike axis, geosteering, global minimum search algorithm DIRECT, VisiTrak tool, AziTrak tool.

Для повышения эффективности геонавигации, в частности, при проводке наклонных и горизонтальных скважин в пластах коллекторов малой мощности используются данные электромагнитного каротажа. Улучшение характеристик приборов электромагнитного каротажа приводит к увеличению многообразия сигналов, включая азимутально-чувствительные, с различной глубиной исследований. Прибор AziTrak имеют глубину исследований до 5 м [1]. Сверхглубинный каротажный прибор VisiTrak отражает информацию о геоэлектрических свойствах среды до 30 м [2]. Совместная интерпретация данных различных приборов, особенно в сложных геологических условиях, является актуальной задачей.

Один из стандартных способов совместной интерпретации данных электромагнитного каротажа – локальный подбор одномерной слоистой модели среды на некотором интервале траектории скважины [3]. В большинстве случаев этот способ обработки дает хорошие результаты и используется в режиме реального времени. На практике встречаются ситуации, в которых прибор находится в окрестности более сложной геологической структуры, такой как выклинивание пласта, субвертикальный разлом, стратиграфическое несогласие и др. В таких ситуациях слоистая модель является неудовлетворительной для описания среды, особенно при использовании сверхглубинных измерений.

В данной работе интерпретацию данных каротажа в более сложных геологических структурах предлагается проводить с использованием двумерной геоэлектрической модели среды с плоскими границами параллельными оси простирания структуры. Для такой модели среды разработан комплекс программ прямого моделирования и инверсии измерений приборов электромагнитного каротажа, созданный на основе метода граничных интегральных уравнений [4]. Инверсия осуществляется при помощи алгоритма поиска глобального минимума DIRECT [5]. Параметрами инверсии являются положения плоских границ среды и сопротивления областей двумерной геоэлектрической модели среды. Используемый алгоритм позволяет не только искать глобальный минимум, но и находить локальные минимумы и области эквивалентности в пространстве параметров.

В работе рассмотрены два модельных примера, основанных на двумерной геоэлектрической модели среды. Первый – выклинивания продуктивного пласта (рис. 1, слева). Результат интерпретации синтетических сигналов, полученных с помощью прямого 2D-моделирования, в рамках поинтервальной (один интервал составляет 10 м) слоистой одномерной модели среды приведен на рис. 1 (справа). Хорошее качество восстановленной модели позволяет сделать предположение о том, что произошло действительно выклинивание пласта. Положение и угол ближайшей к траектории границы, а также сопротивления областей определяются достаточно точно в рамках поинтервальной одномерной инверсии. Поэтому с помощью двумерной инверсии будем подбирать положение  $v$  и угол  $dip$  дальней границы (рис. 1, слева). Получены результаты двумерной двухпараметрической инверсии с использованием приборов AziTrak и VisiTrak и инверсии с использованием только прибора AziTrak. На рис. 2 приведена невязка на некотором шаге алгоритма DIRECT между сигналами, зависящими от параметров  $dip$  и  $v$ , и “истинными” сигналами при  $dip = 90$ ,  $v = -3$ . Под невязкой понимается среднеквадратичное отклонение всех сигналов с учетом стандартной ошибки приборов по всем точкам некоторого интервала траектории. По сгущению прямоугольников и их цвету (рис. 2, слева) видно, что при совместном использовании обоих приборов алгоритм инверсии сходится к точному решению. Если же использовать только прибор AziTrak, то невязка во всей рассматриваемой области меньше одной стандартной ошибки прибора (рис. 2, справа), т. е. добавление случайного шума приведет к невозможности определения положения нижней границы. Таким образом, с использованием

прибора VisiTrak точность определения нижней границы существенно повышается.

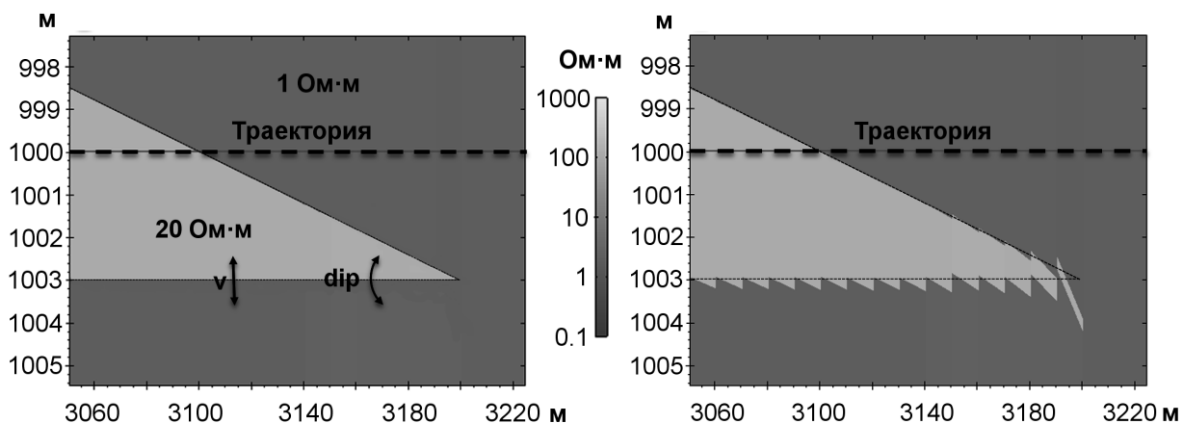


Рис. 1. Двумерная модель выклинивания пласта (слева) и результат интерпретации в рамках поинтервальной слоистой одномерной модели (справа)

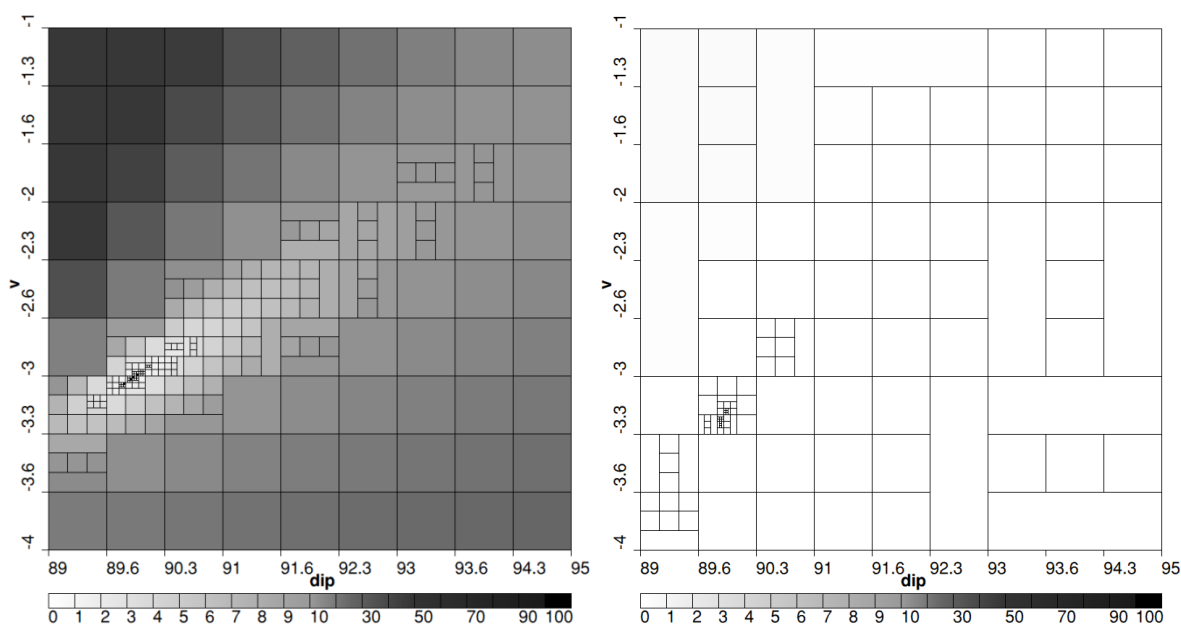


Рис. 2. Невязка в случае выклинивания пласта с использованием прибора VisiTrak (слева) и без использования (справа), единица измерения шкалы цветовой гаммы – стандартная ошибка прибора

Второй модельный пример – субвертикальный разлом (рис. 3, слева). В этом случае интерпретация синтетических сигналов в рамках поинтервальной слоистой модели в окрестности разлома не согласуется с оригинальной моделью (рис. 3, справа). Более того, на интервале 1100-1115 м вдоль траектории невозможно точно определить, где находится продуктивный пласт, сверху или снизу. Лишь на удалении 10 м до и 20 м после разлома удается подобрать локальную слоистую модель среды. В связи с этим обстоятельством предлагается

следующая схема инверсии в двумерной модели в области разлома. Слоистая модель среды фиксируется, а положение  $h$  и сдвиг слоев  $v$  в области разлома варьируются (рис. 3, слева). Получены результаты двумерной двухпараметрической инверсии как с использованием прибора VisiTrak, так и без него. На рис. 4 приведена невязка на некотором шаге алгоритма DIRECT в зависимости от  $h$  и  $v$ . “Истинные” сигналы получены при  $h = 0$ ,  $v = 1$ . Из рис. 4 (слева) видно, что в плоскости параметров  $h$ ,  $v$  выделяются три полосы с локальными минимумами:  $v \approx -5$ ,  $v \approx -2$  и  $v \approx 1$ . Первая полоса соответствует тому, что пласт после разлома сдвинулся вниз, вторая – не сдвинулся, третья – сдвинулся вверх. Если смотреть по величине невязки, то алгоритм сходится к значениям первоначальной модели,  $h = 0$ ,  $v = 1$ . В остальных двух полосах невязка превосходит 10 стандартных ошибок прибора. Вариант  $h = 0$ ,  $v = -5$  является зеркальным отражением первоначальной модели относительно траектории, и невязка в этом случае велика из-за несогласованности азимутально-чувствительных измерений. При использовании только прибора AziTrak алгоритм также сходится к параметрам первоначальной модели с выделением трех подобластей с локальными минимумами (рис. 4, справа). Отметим, что в этом чувствительность к параметру  $v$  падает, о чем свидетельствует наличие светлых зон на рис. 4 (справа), которых нет в левой части этого же рисунка. Чувствительность к параметру  $h$  достаточно высока в обоих случаях, так как приборы пересекают границу с большим контрастом проводимостей 100:1, а параметр  $h$  отвечает за положение этой границы.

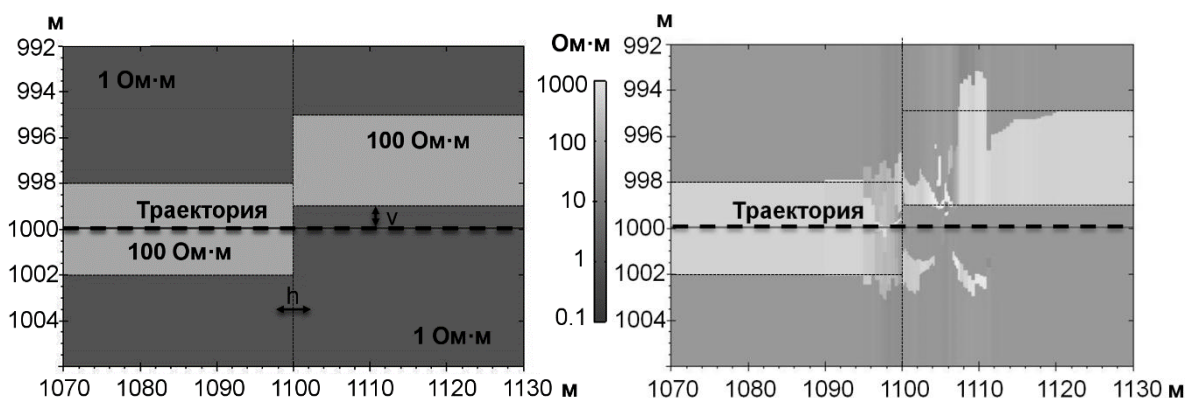


Рис. 3. Двумерная модель разлома (слева) и результат интерпретации в рамках локальной слоистой одномерной модели (справа)

В работе приведены примеры одномерной и двумерной интерпретации синтетических данных электромагнитного каротажа, полученных вблизи распространённых геологических структур: выклинивания пласта и разлома. Для данных примеров описаны схемы и параметры двумерной инверсии, в результате которой восстанавливаются параметры геоэлектрической модели. Использование сигналов приборов с глубиной исследования до 30 м позволяет определить параметры искомой модели существенно точнее.

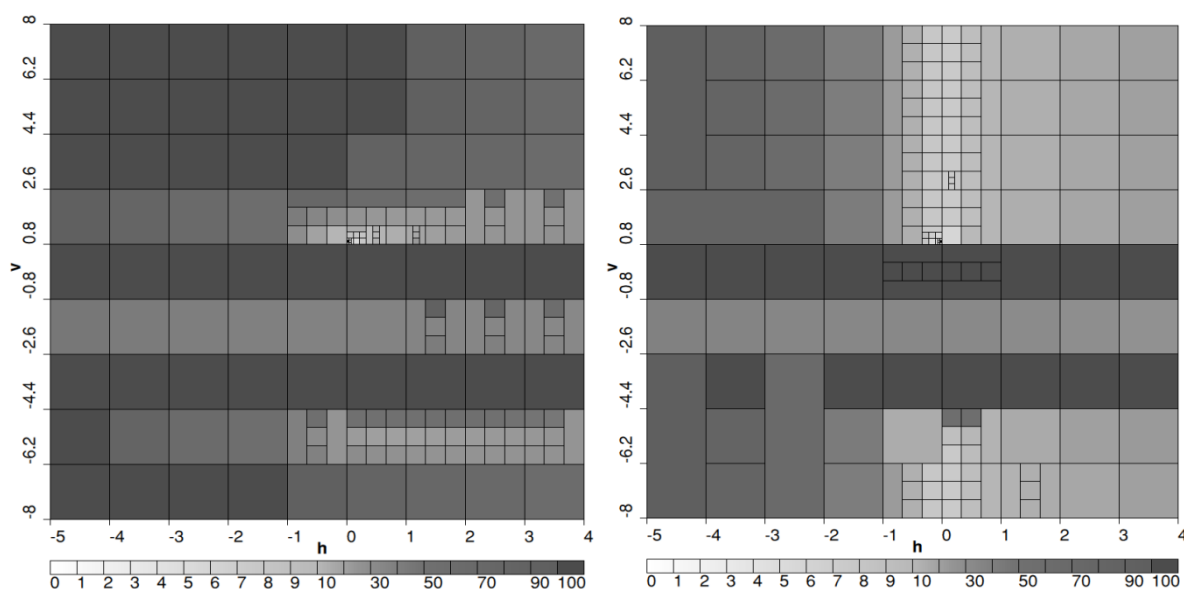


Рис. 4. Невязка в случае разлома с использованием прибора VisiTrak (слева) и без использования (справа)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Navigating and Imaging in Complex Geology With Azimuthal Propagation Resistivity While Drilling / Bell C., Hampson J., Eadsforth P., Chemali R.E., Helgesen T.B., Meyer W.H., Randall R., Peveto C., Poppitt A., Signorelli J., Wang T. // SPE Annual Technical Conference and Exhibition - San Antonio, Texas, USA, 24-27 September, 2006.
2. Verification Testing of a New Extra-Deep Azimuthal Resistivity Measurement / Hartmann A., Vianna A., Maurer H.-M., Sviridov M., Martakov S., Lautenschläger U., Antonsen F., Olsen P.A., Constable M.V. // SPWLA 55th Annual logging Symposium - Abu Dhabi, United Arab Emirates, 18-22 May, 2014.
3. Sviridov M., Mosin A., Antonov Yu., Nikitenko M., Martakov S., Rabinovich M. New Software for Processing of LWD Extradep Resistivity and Azimuthal Resistivity Data // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. - 2014. - Vol. 17. - P. 109-127.
4. Dyatlov G.V., Onegova E.V., Dashevsky Yu.A. Efficient 2.5D electromagnetic modeling using boundary integral equations // Geophysics. - 2015. - Vol. 80 (3). - P 163-173.
5. Jones D.R., Perttunen C.D., Stuckmann B.E. Lipschitzian optimization without the lipschitz constant // Journal of Optimization Theory and Applications. - 1993. - Vol. 79 (1). - P. 79-157.

© Д. Ю. Кушнир, Г. В. Дятлов, А. И. Макаров, Ю. А. Дашевский, 2016