# 

Геофизические технологии, № 2, 2021, с. 36–48 doi: 10.18303/2619–1563–2021–2–36 **www.rjgt.ru** УДК 550.832

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЛЕГАНИЯ ПЛАСТОВ ПО ДАННЫМ КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

М.Н. Никитенко<sup>1</sup>, М.Б. Рабинович<sup>2</sup>, М.В. Свиридов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, <sup>2</sup>Компания ВР, 77079, Хьюстон, Техас, бул. Вестлейк-Парк, 501, США, <sup>3</sup>Компания ROGII, 77084, Хьюстон, Техас, ул. Парк Тен, 16000, США e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Разработан оригинальный метод оценки угла и азимута падения пластов по данным индукционного каротажа в процессе бурения методом переходных процессов, основанный на фокусировке во временной области. Идея фокусировки заключается в разложении измеренных сигналов во временной ряд и диагонализации матрицы сфокусированных компонент магнитного поля. Выполнена реализация метода и его всестороннее тестирование в горизонтально-слоистых средах, используемых при инверсии данных в процессе бурения для решения задач геонавигации и определения удельного электросопротивления пластов. Оценки углов позволяют повысить эффективность геонавигации при выборе направления бурения скважины, а также точность инверсии данных в случаях сложных моделей сред. Существенное сокращение ресурсоемкости инверсии и модельной эквивалентности достигается за счет уменьшения числа определяемых параметров.

Угол и азимут падения пластов, каротаж в процессе бурения, метод переходных процессов, электромагнитное поле, численная инверсия, геоэлектрическая модель

# DETERMINATION OF FORMATION DIP AND STRIKE FROM TRANSIENT LWD ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

M.N. Nikitenko<sup>1</sup>, M.B. Rabinovich<sup>2</sup>, M.V. Sviridov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, <sup>2</sup>BP, Westlake Park Blvd, 501, Houston, TX 77079, USA, <sup>3</sup>ROGII, Park Ten Place, 16000, Houston, TX 77084, USA, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

An original method has been developed for estimating formation dip and strike from transient induction LWD data, based on focusing in the time domain. The focusing consists in decomposing the measured signals into a time series and diagonalizing the matrix of focused magnetic field components. We have implemented the method and comprehensively tested it in horizontally-layered media used for LWD data inversion to solve geosteering problems and evaluate the formation resistivity. Estimates of the angles contribute to reliable geosteering when choosing a direction of drilling, as well as when inverting data for a complex earth model. A significant reduction in the resource intensity of inversion and model equivalence is achieved by reducing the number of determined parameters.

Formation dip and strike, logging while drilling, transient method, electromagnetic field, numerical inversion, geoelectric model

© М.Н. Никитенко, М.Б. Рабинович, М.В. Свиридов, 2021

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение электромагнитного поля в методе переходных процессов (МПП), в отличие от традиционных частотных зондирований, происходит после выключения тока в генераторной катушке, в зависимости от времени. Преимуществами МПП являются отсутствие в измеряемом сигнале прямого поля, возможность использовать различные токовые импульсы в зависимости от решаемой задачи, регистрация э.д.с. на широком временном интервале, обеспечивающая зонду необходимую глубинность, представление сигнала в виде непрерывной кривой, которую легко освободить от случайного шума.

Первые работы по исследованию возможностей индукционного каротажа методом переходных процессов (ИК МПП) появились в конце 1960-х годов. Авторов, в первую очередь, интересовали вопросы повышения глубинности исследований за счет измерения сигналов на поздних временах на сравнительно небольших расстояниях от источника поля. Наиболее известна работа А.А. Кауфмана и В.П. Соколова [Кауфман, Соколов, 1972], в которой рассмотрено поведение электромагнитного поля в базовых моделях сред: на оси скважины и в пластах ограниченной мощности. Есть более ранние статьи [Кауфман, 1969; Плюснин, Вильге, 1969; Кауфман, Терентьев, 1971]. В дальнейшем в исследованиях российских и зарубежных авторов поднимались различные вопросы использования ИК МПП, такие как: моделирование нестационарного поля для исследования сигналов в сложных моделях сред [Anderson, Chew, 1989; Tabarovsky et al., 1996; Онегова, Эпов, 2011], создание новых методов зондирования на основе сверхкоротких электромагнитных импульсов [Дворецкий, Ярмахов, 1998; Эпов и др., 2007], исследование возможностей метода, в том числе для задач геонавигации, и сравнительный анализ частотного и нестационарного зондирования [Onegova et al., 2010; Онегова, Эпов, 2011; Мосин, Могилатов, 2015, 2018; Ратушняк, Теплухин, 2017], подавление влияния бурильной трубы при обработке данных, полученных в процессе бурения и определение параметров слоистой среды [Seydoux et al., 2003; Bespalov et al., 2006; Itskovich, 2018], применение метода в дефектоскопии [Сидоров, 1996; Эпов и др., 2002], мониторинг резервуаров [Dutta et al., 2012], а также быстрая инверсия данных, полученных в процессе бурения [Itskovich, Nikitenko, 2017; Itskovich et al., 2018]. Известны исследования, посвященные определению относительных углов наклона и азимута пластов по данным ИК МПП. Соответствующий метод базируется на возможности диагонализации матрицы компонент поля на поздних временах, где справедливы степенные асимптотики сигналов [Banning et al., 2009]. Недостатком данного метода является то, что на поздних временах, где справедливы асимптотики, сигналы малы и не могут быть измерены с необходимой точностью.

В работе для оценки элементов залегания пластов, а именно угла и азимута падения пластов, предлагается использовать метод фокусировки во временной области – Multi-Time Focusing (MTF) technique [Nikitenko et al., 2015]. Оценки углов способствуют надежной геонавигации, а также, в случае инверсии данных для сложной модели среды, позволяют существенно сократить ресурсоемкость инверсии и модельную эквивалентность за счет уменьшения числа определяемых параметров. Метод протестирован на серии вертикально-неоднородных моделей среды в зависимости от наличия измеренных компонент поля. Обработка синтетических данных подтвердила эффективность разработанного алгоритма.

37

### МЕТОД ФОКУСИРОВКИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Базовой моделью среды при определении углов является модель с плоскопараллельными границами (рис. 1), где каждый слой характеризуется удельным электрическим сопротивлением (УЭС). Каротажный зонд расположен наклонно относительно границ. Относительный угол наклона зонда  $\theta$  – это угол между осью зонда и нормалью к напластованию. Декартова система координат определяется таким образом, что ось *z* совпадает с осью зонда. Известно, что в процессе бурения зонд вращается вокруг своей оси и координатная плоскость *Оху* также вращается вместе с зондом. При этом угол вращения  $\phi$  отсчитывается от линии, перпендикулярной оси *z* и лежащей в плоскости, образованной осью *z* и нормалью к напластованию. Зонд состоит из генераторных и приемных катушек, ориентированных вдоль координатных осей. Источником электромагнитного поля является ток заданной формы в генераторной катушке, в приемных катушках измеряется наведенная э.д.с. в зависимости от времени.



**Рис. 1.** Модель среды и расположение зонда: ρ<sub>i</sub> – УЭС слоя, Т – генераторная катушка, R – приемная, θ – угол между осью зонда и нормалью к напластованию, φ – угол вращения зонда

Способ определения угла и азимута падения пластов с использованием многочастотной фокусировки (MFF – multi frequency focusing) основан на извлечении из частотного сигнала сфокусированного MFF-сигнала, порожденного первичным полем и не зависящего от неоднородностей, и описан в работах [Tabarovsky, Rabinovich, 1998, 2008; Zhang et al., 2003, 2004; Rabinovich et al., 2005, 2011]. Фокусировка во временной области основана на том же принципе и состоит из следующих шагов:

- Извлечение из измеренных э.д.с. сфокусированного МТF-сигнала сигнала, зависящего только от некоторого эффективного УЭС однородной среды и параметров зонда. Данный сигнал является коэффициентом при степени t<sup>5/2</sup> в разложении э.д.с. в ряд по времени.
- 2. Вычисление угла наклона относительно нормали к напластованию и угла вращения зонда из системы уравнений, связывающих MTF-сигналы с данными углами и главными компонентами поля.
- 3. Вычисление угла и азимута падения пластов через угол наклона относительно пластов и угол вращения зонда с использованием данных инклинометрии и азимута скважины.

Главные компоненты – это трансформации поля в такую систему координат, где матрица наблюдений имеет лишь диагональные элементы, причем XX и YY компоненты совпадают [Tabarovsky, Rabinovich, 1998]. В обозначении первая заглавная буква означает направление момента генераторной катушки, вторая – приемной в системе координат зонда.

Такие трансформации возможны для MFF-сигналов, поскольку это сигналы в однородной среде. Данное утверждение следует из частотного или временного разложения в ряд магнитного поля или э.д.с. [Rabinovich et al., 2005; Bespalov et al., 2006]. При реализации метода учитывается специфика измерений во времени, которая состоит в следующем. Временной ряд, в который раскладывается сигнал, является знакопеременным и медленно убывающим. С одной стороны, необходимо иметь больше слагаемых этого ряда для точной оценки MTF-сигнала – аналога MFF-сигнала, с другой стороны система уравнений для определения MTF-сигнала становится плохо обусловленной с увеличением числа неизвестных параметров. Невозможность использования поздних времен, где справедливы степенные асимптотики для сигналов, но сами сигналы затухают и становятся не измеряемыми, также отрицательно влияет на конечный результат. Принимая во внимание все эти особенности, извлечение MTF-сигнала становится возможным только после тщательного выбора времен и количества слагаемых в разложении во временной ряд. Будет показано, что только первый член ряда, содержащий S<sub>52</sub>, может быть определен с приемлемой точностью. Остальные члены ряда не могут быть определены, но влияют на результат и должны учитываться.

На втором шаге для определения углов применяется либо перебор возможных значений углов и решение линейной системы уравнений для каждой пары значений углов, либо любой метод решения нелинейной системы уравнений для определения четырех неизвестных: двух главных компонент поля, угла наклона относительно пластов θ и угла вращения φ по MTF-сигналам. Количество сигналов не может быть меньше четырех. Обязательно используются диагональные компоненты XX, YY и ZZ, а также перекрестные XZ и/или ZX, которые измеряются с меньшей погрешностью по сравнению с остальными.

Вычисление МТF-сигналов. Пусть временной сигнал освобожден от случайного шума с помощью фильтрации и сглаживания. Измеренная э.д.с. раскладывается по степеням *t*.

$$V = S_{5/2} \cdot t^{-5/2} + S_{7/2} \cdot t^{-7/2} + S_{9/2} \cdot t^{-9/2} + S_{11/2} \cdot t^{-11/2} + \dots$$
(1)

Для измерений на нескольких временах V справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ \cdots \\ V_{m-1} \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^{5/2} & f_1^{7/2} & f_1^{9/2} & \cdots & f_1^{n/2} \\ f_2^{5/2} & f_2^{7/2} & f_2^{9/2} & \cdots & f_2^{n/2} \\ f_3^{5/2} & f_3^{7/2} & f_3^{9/2} & \cdots & f_3^{n/2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_4^{5/2} & f_4^{7/2} & f_4^{9/2} & \cdots & \vdots & \vdots \\ f_{m-1}^{5/2} & f_{m-1}^{7/2} & f_{m-1}^{9/2} & \cdots & f_{m-1}^{n/2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_m^{5/2} & f_m^{7/2} & f_m^{9/2} & \cdots & f_m^{n/2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{5/2} \\ S_{7/2} \\ S_{9/2} \\ \vdots \\ S_{n/2} \end{bmatrix}$$

или в матричном виде

$$\vec{V} = \tilde{\vec{T}} \cdot \vec{\tilde{S}}.$$
 (2)

Из этой системы определяется вектор неизвестных коэффициентов S.

Здесь *n* = 5, 7, 9, 11, .... Длина вектора Š́ равна *l*=(*n*-3)/2; *m*≥*l*.

Используется нормировка для улучшения обусловленности матрицы  $\hat{T}$ . Матрица системы (2) умножается справа на нормировочную матрицу  $\hat{N}$ :

М.Н. Никитенко и др., Геофизические технологии, 2021, 2, 36–48

$$\widehat{N} = \begin{bmatrix} t_1^{5/2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t_1^{7/2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & t_1^{9/2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & t_1^{n/2} \end{bmatrix}$$

Тогда (2) запишется в виде:

$$\vec{V} = \vec{\tilde{T}} \cdot \vec{S}. \tag{3}$$

Если времена возрастают геометрически, то матрица системы (3) выглядит следующим образом:

$$\widehat{T} = \widehat{T} \cdot \widehat{N} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ p^{-5/2} & p^{-7/2} & p^{-9/2} & \dots & p^{-n/2} \\ (p^2)^{-5/2} & (p^2)^{-7/2} & (p^2)^{-9/2} & \dots & (p^2)^{-n/2} \\ (p^3)^{-5/2} & (p^3)^{-7/2} & (p^3)^{-9/2} & \dots & (p^3)^{-n/2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (p^{m-2})^{-5/2} & (p^{m-2})^{-7/2} & (p^{m-2})^{-9/2} & \dots & (p^{m-2})^{-n/2} \\ (p^{m-1})^{-5/2} & (p^{m-1})^{-7/2} & (p^{m-1})^{-9/2} & \dots & (p^{m-1})^{-n/2} \end{bmatrix},$$

где  $p=t_i/t_{i-1}$ , i=2, m.

Вектор неизвестных:

$$\vec{\tilde{S}} = \widehat{N}^{-1} \cdot \vec{\tilde{S}} = \begin{bmatrix} S_{5/2} \cdot t_1^{-5/2} \\ S_{7/2} \cdot t_1^{-7/2} \\ S_{9/2} \cdot t_1^{-9/2} \\ \vdots \\ S_{n/2} \cdot t_1^{-n/2} \end{bmatrix}.$$

Система (3) решается методом сингулярного разложения (SVD), который дает решение с минимальной нормой. В качестве результата получается MTF-сигнал  $S_{5/2} = \widetilde{S}_1 \cdot \widetilde{t}_1^{5/2}$ .

**Вычисление углов наклона и вращения.** Пусть, для удобства записи, *R* = *S*<sub>5/2</sub>. Как показано в [Rabinovich et al., 2005], измеренные MTF-сигналы связаны с главными компонентами следующим образом:

$$\begin{bmatrix} R_{xx} \\ R_{xy} \\ R_{xy} \\ R_{xz} \\ R_{yx} \\ R_{yz} \\ R_{yz} \\ R_{zz} \\ R_{zz} \\ R_{zz} \\ R_{zz} \\ R_{zz} \\ R_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \theta \\ \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot \sin^2 \theta & -\cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot \sin^2 \theta \\ \cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta & -\cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot \sin^2 \theta \\ \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \theta + \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \theta \\ -\sin \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta & \sin \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \\ -\sin \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta & -\cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \\ -\sin \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta & \sin \varphi \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{xx}^p \\ R_{zz}^p \\ R_{zz}^p \end{bmatrix}.$$
(4)

Здесь  $R_{xx}^{\rho}$ ,  $R_{zz}^{\rho}$  – главные компоненты,  $\theta$  – угол наклона,  $\phi$  – угол вращения.

Угол и азимута падения пластов вычисляются с помощью углов относительного наклона и вращения, а также данных инклинометрии и азимута скважины [Rabinovich et al., 2005].

М.Н. Никитенко и др., Геофизические технологии, 2021, 2, 36-48



Рис. 2. Блок-схема определения углов наклона и вращения по измеренным сигналам каротажа МПП

Пары компонент *R<sub>xy</sub>* и *R<sub>yx</sub>*, *R<sub>xz</sub>* и *R<sub>zx</sub>*, *R<sub>yz</sub>* и *R<sub>zy</sub>* имеют одинаковое представление через главные компоненты. Компоненты в паре совпадают по определению, но могут отличаться на практике. Причинами могут быть недостаточно точное вычисление MTF-сигналов ввиду недостатка поздних времен, а также присутствие ошибок измерения. Таким образом, следует выбирать подходящие компоненты, чтобы невязка при решении системы (4) не превосходила установленную ошибку измерения.

Блок-схема определения углов наклона и вращения показана на рис. 2.

## ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для иллюстрации описанного выше метода определения углов наклона и вращения зонда были смоделированы сигналы каротажа МПП для трехслойной модели среды, изображенной на рисунке 1. Зонд находится в пласте с сопротивлением р₂ = 30 Ом·м. Выше и ниже находятся более проводящие толщи пород: р₁ = 1 Ом·м, р₃ = 2 Ом·м. Расстояние от источника Т до верхней границы пласта – 2 м, до нижней – 6 м.

### Система измерений

– Двухкатушечный зонд; расстояние между источником Т и приемником R – 5 м.

– Импульс тока в генераторной катушке соответствует выключению тока.

– В приемной катушке измеряется э.д.с., время измерения сигнала отсчитывается от момента выключения тока.

– Момент зонда – 1 А·м⁴.

– Измеряются все компоненты: XX, XY, XZ, YX, YY, YZ, ZX, ZY и ZZ.

- Сигнал регистрируется с геометрическим шагом на 200 временных отсчетах от 5 мкс до 0.5 мс.
- Относительный угол наклона θ и угол вращения φ изменяются от 0 до 90°.

В результате численных экспериментов были выбраны следующие параметры решения задачи:

- 16 времен от 0.35 до 0.5 мс;
- 4 слагаемых в разложении во временной ряд.

Два или три слагаемых могут быть достаточны, если используются все 9 компонент поля; пять слагаемых в разложении делают систему (3) неустойчивой из-за возрастания числа обусловленности матрицы  $\hat{T}$ .

**Вычисление МТF-сигналов.** Для {θ, φ} = {36°, 54°} показано, как количество слагаемых, используемых в разложении (1), отражается на вычислении МТF-сигналов для различных компонент поля CC (CC = XX, XY, XZ, YX, YY, YZ, ZX, ZY, ZZ) (табл. 1).

#### Таблица 1

# МТF-сигналы (мВ⋅мкс<sup>5/2</sup>) в зависимости от количества слагаемых *N*<sub>s</sub>, используемых в разложении, и обусловленность матрицы разложения *u*

CC	XX	XY	XZ	YX	YY	YZ	ZX	ZY	ZZ	U
Ns										
2	-11.1	1.44	2.69	1.44	-12.0	-3.71	2.15	-2.96	-15.7	21
3	-11.9	1.57	2.88	1.57	-13.0	-3.96	2.44	-3.36	-17.0	490
4	-12.6	1.63	2.94	1.63	-13.5	-4.05	2.57	-3.54	-17.8	>105
5	-12.8	1.58	2.96	1.58	-13.3	-3.96	2.62	-3.55	-17.6	3·10⁵

Наблюдается некоторая стабильность в поведении МТF-сигналов при изменении количества слагаемых, но вычислить МTF-сигналы с заданной точностью невозможно. Кроме того, компоненты  $R_{xz}$  и  $R_{zx}$ ,  $R_{yz}$  и  $R_{zy}$  не совпадают, как было указано ранее. Таким образом, число слагаемых должно выбираться в результате серии испытаний для установленных временных отсчетов.

Обусловленность матрицы  $\tilde{T}$  показана в табл. 1 в последнем столбце. Следует отметить, что число времен и геометрический шаг по времени также влияют на величину обусловленности, поэтому данные параметры были выбраны так, чтобы минимизировать обусловленность и улучшить таким образом решение. В случае пяти слагаемых обусловленность слишком велика и ошибки в практических данных могут разрушить решение.

В таблице 2 приведены значения членов ряда  $S = S_{j/2} \cdot t^{j/2}$ , j = 5, 7, 9, 11, 13 для сигнала  $R_{xx}$  в зависимости от числа слагаемых, использованных в разложении.

Таблица 2

# Значения членов ряда *S<sub>j/2</sub>·t<sup>j/2</sup>* (нВ) для сигнала *R<sub>xx</sub>* в зависимости от числа слагаемых *N<sub>s</sub>* при *t* = 0.35 мс

S N₅	$S_{5/2} \cdot t^{5/2}$	S <sub>7/2</sub> ·t <sup>7/2</sup>	S <sub>9/2</sub> ·t <sup>9/2</sup>	S <sub>11/2</sub> ·t <sup>11/2</sup>	S <sub>13/2</sub> ·t <sup>13/2</sup>
2	-4.73	0.893			
3	-5.09	1.73	-0.479		

4	-5.35	2.63	-1.53	0.405	
5	-5.47	3.22	-2.57	1.22	-0.235

Как видно, значения членов ряда, за исключением первого  $S_{5/2} \cdot t^{5/2}$ , получаются самые разные. Вычислить их не получается из-за того, что времена измерений недостаточно поздние и для сходимости ряда надо брать гораздо больше его членов. Но при возрастании порядка системы (3) ухудшаются свойства матрицы. Таким образом, следует искать такой компромисс между количеством членов ряда и обусловленностью матрицы, при котором первое слагаемое, определяющее MTF-сигнал, определяется стабильно.

**Вычисление углов наклона и вращения.** Здесь рассмотрены различные значения углов от 0 до 90° с шагом 18°. Приведены результаты оценки углов в случаях, когда измерялись различные наборы компонент поля (табл. 3–5). Минимально необходимое число компонент – четыре (по числу неизвестных системы (4)). Для определения углов использовался перебор их значений с дискретизацией 0.5°. Для каждой пары  $\{\theta, \phi\} = \{i/2^\circ, j/2^\circ\}, i, j = 1, 180$  решалась линейная система (4) с помощью SVD метода. Пара значений  $\{\theta, \phi\}$ , для которой решение наилучшим образом удовлетворяло системе, считалась оценкой искомых углов. В таблицах каждая ячейка содержит подобранные значения углов: вверху – угол вращения, внизу – угол наклона. Оценены и погрешности восстановления углов (случай  $\theta = 0^\circ$  не принимался во внимание). При использовании 9-ти компонент поля средняя абсолютная ошибка определения  $\theta - 0.4^\circ$ , средняя абсолютная ошибка определения  $\theta - 0.4^\circ$ , средняя абсолютная ошибка оределения  $\theta - 0.4^\circ$ .

Таблица 3

φ	0	18	36	54	72	90				
θ										
		Произвольный								
0			(	)						
	3	18	36	54	72	87				
18	18	18	18	18	18	18				
	5	18	36	54	72	85				
36	36	36	36	36	36	36				
	5	17.5	35.5	54.5	72.5	85				
54	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5				
	5	18	36	54	72	85				
72	73	73.5	73.5	73.5	73.5	73				
	0.5	18	36	54	72	89.5				
90	90	90	90	90	90	90				

# Оценки углов в градусах при использовании 9-ти компонент поля

Таблица 4

Оценки углов в градусах при использовании XX, YY, ZZ, XZ и ZX компонент

φ	0	18	3	54	72	90				
θ										
	Произвольный									
0	0									

	4	19	36.5	55.5	71.5	90
18	18	18	18	18.5	17.5	18
	0	17	37	53	72.5	90
36	35.5	35.5	36	35.5	36.5	36
	0	14	34.5	55	72.5	85
54	55	54	54	54	54	54
	5.5	16	36	54.5	72.5	88.5
72	73.5	73	73.5	73	72.5	72.5
	2	18	34.5	54	72	87.5
9	90	90	90	90	90	88.5

М.Н. Никитенко и др., Геофизические технологии, 2021, 2, 36–48

Рисунок 3 визуализирует результаты из табл. 3, 4.



Рис. 3. Оценки углов при использовании девяти (а) и пяти компонент поля (б). Узлы сетки – истинные значения углов

Таблица 5

Оценки углов в градусах при использовании XX, YY, ZZ и XZ компонент

φ	0	18	36	54	72	90
θ						
			Произв	ольный		
0			(	)		
	15.5	24	36.5	53	71.5	90
18	19.5	19.5	19	18.5	18.5	18
	17	23.5	38	52.5	71	90
36	38	37.5	37.5	36.5	36	36
	13.5	21.5	37	53.5	71	90
54	54	54	54	54	54	54
	10.5	20	37	53.5	70.5	88.5
72	70	70	70	70	71.5	72.5
	10	20.5	37	53.5	73.5	85.5
90	87	87	87	87	86.5	86

В случае четырех компонент оценки ухудшаются. Средняя абсолютная ошибка определения *θ* – 1.3°, средняя абсолютная ошибка для *φ* – 3.6°. Тем не менее даже такие оценки будут полезны, например, при последующей инверсии.

Таким образом, предложенный метод определения углов, показывает свою эффективность на синтетических примерах, причем конструктивные параметры зонда соответствуют реально допустимым.

Результаты примерно одинаковые при использовании всех 9-ти компонент поля и когда используются только пять компонент XX, YY, ZZ, XZ и ZX. Угол наклона пластов относительно скважины определяется с очень хорошей точностью 0.4°. Точность определения угла вращения несколько хуже – 1.2°. В случае использования четырех компонент XX, YY, ZZ, XZ средняя ошибка угла наклона пластов увеличивается до 1.3°, а угла вращения – до 3.6°.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод оценки углов наклона и азимута пластов по данным индукционного каротажа методом переходных процессов, основанный на фокусировке во временной области. Выполнено всестороннее тестирование метода в горизонтально-слоистых средах, используемых при инверсии данных в процессе бурения для решения задач геонавигации и определения удельного электросопротивления пластов. Тестирование метода показало, что для определения углов с точностью около 1 % необходимо измерять пять компонент электромагнитного поля: XX, YY, ZZ, XZ и ZX.

### ЛИТЕРАТУРА

**Дворецкий П.И., Ярмахов И.Г.** Электромагнитные и гидродинамические методы при освоении нефтегазовых месторождений. – М.: Недра, 1998. – 318 с.

Кауфман А.А. Индукционный каротаж методом переходных процессов // Геология и геофизика. – 1969. – № 7. – С. 125–131.

Кауфман А.А., Терентьев С.А. Нестационарное электромагнитное поле вертикального магнитного диполя в пластах ограниченной мощности // Физика Земли. – 1971. – № 9. – С. 85–87.

Кауфман А.А., Соколов В.П. Теория индукционного каротажа методом переходных процессов. – Новосибирск: Наука, 1972. – 128 с.

**Мосин А.П., Могилатов В.С.** Некоторые вопросы обоснования электромагнитного каротажа методом переходных процессов // Каротажник. – 2015. – Вып. 258. – С. 63–80.

**Мосин А.П., Могилатов В.С.** Средства математического анализа электромагнитного каротажа методом переходных процессов в цилиндрически-слоистой среде // Каротажник. – 2018. – Вып. 288. – С. 73–84.

Онегова Е.В., Эпов М.И. Трехмерное моделирование нестационарного электромагнитного поля для задач геонавигации горизонтальных скважин // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 7. – С. 925–930.

Плюснин М.И., Вильге Б.И. К обоснованию индукционного каротажа по методу переходных процессов // Известия вузов. Геология и разведка. – 1969. – № 5. – С. 158–165.

**Ратушняк А.Н., Теплухин В.К.** Физико-теоретические и экспериментальные основы индуктивных методов исследований скважин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2017. – 124 с.

**Сидоров В.А.** Скважинные дефектоскопы-толщиномеры для исследования многоколонных скважин // Каротажник. – 1996. – Вып. 24. – С. 83–94.

**Эпов М.И., Морозова Г.М., Антонов Е.Ю.** Электромагнитная дефектоскопия обсадных колонн нефтегазовых скважин. – Новосибирск: Гео, 2002. – 104 с.

Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. Электромагнитное зондирование флюидонасыщенного слоистого коллектора наносекундными импульсами // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1357–1365.

Anderson B., Chew W.C. Transient response of some borehole mandrel tools // Geophysics. – 1989. – Vol. 54 (2). – P. 216–224, doi: 10.1190/1.1442645.

**Banning E., Hagiwara T., Ostermeier R.** System and method for locating an anomaly ahead of a drill bit // US Patent No. 7538555, publ. May 26, 2009.

**Bespalov A., Rabinovich M., Tabarovsky L**. Deep resistivity transient method for MWD application using asymptotic filtering // US Patent No. 7027922, publ. April 11, 2006.

**Dutta S., Reiderman A., Schoonover L.G., Rabinovich M.B.** New borehole transient electromagnetic system for reservoir monitoring // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 222–232.

Itskovich G. Downhole transient resistivity measurements // US Patent No. 9857499, publ. January 2, 2018.

**Itskovich G., Nikitenko M.** Fast inversion of MWD transient EM data excited by a pulse of an arbitrary shape // US Patent No. 9562990, publ. February 7, 2017.

**Itskovich G., Lee F., Nikitenko M.** Hybrid image of earth formation based on transient electromagnetic measurements // US Patent No. 10139517, publ. November 27, 2018.

**Nikitenko M., Rabinovich M., Sviridov M.** Late time rotation processing of multi-component transient EM data for formation dip and azimuth // US Patent Application No. 14539014, publ. May 14, 2015.

**Onegova E., Nikitenko M., Itskovich G., Reiderman A.** Comparison of resolution power of frequency and time domain measurements in reservoir navigation // EAGE Geomodel 2010 (Gelendzhik, September 13–17, 2010): extended abstracts. – Gelendzhik, 2010. – 188-00094.

**Rabinovich M., Tabarovsky L., Corley B., van der Horst J.** Processing multi-component induction data for formation dip and azimuth in anisotropic formations // The SPWLA 46th Annual Logging Symposium (New Orleans, Louisiana, USA, June 26–29, 2005): transactions. – New Orleans, 2005. – SPWLA-2005-XX.

**Rabinovich M.B., Bespalov A.N., Forgang S.W., Georgi D.T., Itskovich G.B., Tabarovsky L.A.** Transient EM for geosteering and LWD/wireline formation evaluation // US Patent No. 8049507, publ. November 1, 2011.

Seydoux J., Tabanou J., Ortenzi L., Denichou J.M., De Laet Y., Omeragic D., Iversen M., Fejerskov M. A deep-resistivity logging-while-drilling device for proactive geosteering // The Offshore Technology Conference (Houston, Texas, USA, May 5–8, 2003): proceedings. – Houston, 2003. – OTC-15126-MS.

**Tabarovsky L.A., Rabinovich M.B.** Real time 2D inversion of induction logging data // Journal of Applied Geophysics. – 1998. – Vol. 38 (4). – P. 251–275, doi: 10.1016/S0926-9851(97)00034-7.

**Tabarovsky L.A., Rabinovich M.** Determination of formation anisotropy, dip and azimuth // US Patent No. 7392137, publ. June 24, 2008.

Tabarovsky L.A., Goldman M.M., Rabinovich M.B., Strack K.-M. 2.5-D modeling in electromagnetic methods of geophysics // Journal of Applied Geophysics. – 1996. – Vol. 35 (4). – P. 261–284, doi: 10.1016/0926-9851(96)00025-0.

**Zhang Z., Yu L., Tabarovsky L.A., Kriegshäuser B. Simultaneous** determination of formation angles and anisotropic resistivity using multi-component induction logging data // US Patent No. 6643589, publ. November 4, 2003.

**Zhang Z., Yu L., Kriegshäuser B., Tabarovsky L.** Determination of relative angles and anisotropic resistivity using multicomponent induction logging data // Geophysics. – 2004. – Vol. 69 (4). – P. 898–908, doi: 10.1190/1.1778233.

### REFERENCES

Anderson B., Chew W.C. Transient response of some borehole mandrel tools // Geophysics. – 1989. – Vol. 54 (2). – P. 216–224, doi: 10.1190/1.1442645.

**Banning E., Hagiwara T., Ostermeier R.** System and method for locating an anomaly ahead of a drill bit // US Patent No. 7538555, publ. May 26, 2009.

**Bespalov A., Rabinovich M., Tabarovsky L**. Deep resistivity transient method for MWD application using asymptotic filtering // US Patent No. 7027922, publ. April 11, 2006.

**Dutta S., Reiderman A., Schoonover L.G., Rabinovich M.B.** New borehole transient electromagnetic system for reservoir monitoring // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 222–232.

**Epov M.I., Morozova G.M., Antonov E.Yu.** Electromagnetic defectoscopy of casing strings of oil and gas wells [in Russian]. – Geo, Novosibirsk, 2002. – 104 p.

**Epov M.I., Mironov V.L., Komarov S.A., Muzalevsky K.V.** Nanosecond electromagnetic sounding of a fluidsaturated layered formation // Russ. Geol. Geophys. – 2007. – Vol. 48 (12). – P. 1054–1060, doi: 10.1016/j.rgg.2007.11.002.

Itskovich G. Downhole transient resistivity measurements // US Patent No. 9857499, publ. January 2, 2018.

**Itskovich G., Nikitenko M.** Fast inversion of MWD transient EM data excited by a pulse of an arbitrary shape // US Patent No. 9562990, publ. February 7, 2017.

**Itskovich G., Lee F., Nikitenko M.** Hybrid image of earth formation based on transient electromagnetic measurements // US Patent No. 10139517, publ. November 27, 2018.

Kaufman A.A. TEM induction logging // Soviet Geology and Geophysics. – 1969. – No. 7. – P. 125–131.

**Kaufman A.A., Terentyev S.A.** Non-stationary electromagnetic field of a vertical magnetic dipole in layers of limited thickness // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 1971. – No. 9. – P. 85–87.

Kaufman A.A., Sokolov V.P. TEM induction logging theory [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1972. – 128 p.
Mosin A.P., Mogilatov V.S. Some questions on substantiation of TEM electromagnetic logging // Karotazhnik. – 2015. – Vol. 258. – P. 63–80.

**Mosin A.P., Mogilatov V.S.** Means for mathematical analysis of TEM logging in a cylindrical-layered medium // Karotazhnik. – 2018. – Vol. 288. – P. 73–84.

**Nikitenko M., Rabinovich M., Sviridov M.** Late time rotation processing of multi-component transient EM data for formation dip and azimuth // US Patent Application No. 14539014, publ. May 14, 2015.

**Onegova E.V., Epov M.I.** 3D simulation of transient electromagnetic field for geosteering horizontal wells // Russ. Geol. Geophys. – 2011. – Vol. 52 (7). – P. 725–729, doi: 10.1016/j.rgg.2011.06.005.

**Onegova E., Nikitenko M., Itskovich G., Reiderman A.** Comparison of resolution power of frequency and time domain measurements in reservoir navigation // EAGE Geomodel 2010 (Gelendzhik, September 13–17, 2010): extended abstracts. – Gelendzhik, 2010. – 188-00094.

**Plyusnin M.I., Vilge B.I.** To substantiation of TEM induction logging // Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. – 1969. – No. 5. – P. 158–165.

**Rabinovich M., Tabarovsky L., Corley B., van der Horst J.** Processing multi-component induction data for formation dip and azimuth in anisotropic formations // The SPWLA 46th Annual Logging Symposium (New Orleans, Louisiana, USA, June 26–29, 2005): transactions. – New Orleans, 2005. – SPWLA-2005-XX.

**Rabinovich M.B., Bespalov A.N., Forgang S.W., Georgi D.T., Itskovich G.B., Tabarovsky L.A.** Transient EM for geosteering and LWD/wireline formation evaluation // US Patent No. 8049507, publ. November 1, 2011.

**Ratushnyak A.N., Teplukhin V.K.** Physico-theoretical and experimental foundations of inductive well logging methods [in Russian]. – UB RAS, Yekaterinburg, 2017. – 124 p.

Seydoux J., Tabanou J., Ortenzi L., Denichou J.M., De Laet Y., Omeragic D., Iversen M., Fejerskov M. A deep-resistivity logging-while-drilling device for proactive geosteering // The Offshore Technology Conference (Houston, Texas, USA, May 5–8, 2003): proceedings. – Houston, 2003. – OTC-15126-MS.

**Sidorov V.A.** Borehole defectoscopes-calipers for studying multi-column wells // Karotazhnik. – 1996. – Vol. 24. – P. 83–94.

**Tabarovsky L.A., Rabinovich M.B.** Real time 2D inversion of induction logging data // Journal of Applied Geophysics. – 1998. – Vol. 38 (4). – P. 251–275, doi: 10.1016/S0926-9851(97)00034-7.

**Tabarovsky L.A., Rabinovich M.** Determination of formation anisotropy, dip and azimuth // US Patent No. 7392137, publ. June 24, 2008.

Tabarovsky L.A., Goldman M.M., Rabinovich M.B., Strack K.-M. 2.5-D modeling in electromagnetic methods of geophysics // Journal of Applied Geophysics. – 1996. – Vol. 35 (4). – P. 261–284, doi: 10.1016/0926-9851(96)00025-0.

**Zhang Z., Yu L., Tabarovsky L.A., Kriegshäuser B.** Simultaneous determination of formation angles and anisotropic resistivity using multi-component induction logging data // US Patent No. 6643589, publ. November 4, 2003.

**Zhang Z., Yu L., Kriegshäuser B., Tabarovsky L.** Determination of relative angles and anisotropic resistivity using multicomponent induction logging data // Geophysics. – 2004. – Vol. 69 (4). – P. 898–908, doi: 10.1190/1.1778233.

# КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*НИКИТЕНКО Марина Николаевна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований, обоснование новых методов исследования скважин, новые способы интерпретации, разработка программного обеспечения для моделирования и инверсии данных.

РАБИНОВИЧ Михаил Борисович – кандидат технических наук, петрофизик, специалист по электромагнитным методам. Основные научные интересы: разработка программного обеспечения для обработки и интерпретации данных современных электромагнитных комплексов каротажа на кабеле и в процессе бурения, экспертная оценка в выборе технологий исследования нефтегазовых скважин, интерпретация каротажных данных и геонавигация. Вклад в написание статьи был сделан во время работы в компании Baker Hughes.

СВИРИДОВ Михаил Владимирович – руководитель группы прикладной математики компании ROGII. Основные научные интересы: разработка алгоритмов обработки и инверсии данных каротажа во время бурения, геонавигация.

> Статья поступила в редакцию 6 августа 2021 г., принята к публикации 12 октября 2021 г.