



ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ ДЛЯ БЫСТРОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ

М.Н. Никитенко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru*

В работе представлен новый метод инверсии данных метода переходных процессов (МПП) путем преобразования измеренных сигналов в частотную область. Инверсия предполагает поиск таких параметров модели геологической среды, чтобы синтетические данные соответствовали экспериментальным. При этом используется оптимизационный метод, на каждой итерации которого с помощью численного моделирования определяются синтетические данные в соответствии с изменяемыми модельными параметрами. Численное моделирование для МПП является затратной процедурой, поскольку сигнал во временной области обычно вычисляется с помощью обратного преобразования Фурье частотного сигнала, и по сравнению с частотным сигналом время вычисления временного сигнала возрастает в сотни раз. Предлагается трансформировать измеренные сигналы в частотную область и в ней выполнять инверсию, что существенно сокращает временные затраты. Трансформация в частотную область с помощью преобразования Фурье включает извлечение из сигнала первичного поля, вычисленного по специальному алгоритму, что позволяет использовать для преобразования относительно небольшой, реально используемый в МПП временной интервал вместо бесконечного.

Метод переходных процессов, измерения во временной и частотной области, трансформация сигналов, первичное поле, быстрая инверсия

TEM SIGNAL TRANSFORMATIONS TO FREQUENCY DOMAIN FOR FAST DATA INVERSION

M.N. Nikitenko

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru*

The paper presents a new data inversion technique for the transient electromagnetic method (TEM) by converting the measured signals into the frequency domain. The inversion involves a search for such earth model parameters that there is a consistency between the synthetic and field data. We use an optimization method, where through numerical simulation at each iteration the synthetic data are determined in accordance with the changing model parameters. Numerical simulation of TEM signals is a computationally expensive procedure, since the time-domain signal is usually calculated via the inverse Fourier transform of the frequency signal. Consequently, compared to the frequency signal, the time needed to calculate the time signal increases hundreds of times. It is proposed to transform the measured signals into the frequency domain and perform inversion therein, which significantly reduces the time expenditures. Transition into the frequency domain by the Fourier transform includes the extraction of the primary field from the signal, calculated by means of a special algorithm. This fact makes it possible to employ for the transformation a relatively small time interval actually used in TEM instead of an infinite one.

Transient electromagnetic method, time- and frequency-domain measurements, signal transformation, primary field, fast inversion

ВВЕДЕНИЕ

Метод переходных процессов (МПП) имеет большие перспективы во многих задачах как промышленной, так и экологической геофизики. Среди них: геонавигация [Tabarovsky et al., 1996; Seydoux et al., 2003; Besspalov et al., 2006; Dutta et al., 2012; Itskovich, Nikitenko, 2017; Itskovich, 2018; Itskovich et al., 2018; Никитенко и др., 2021а; Никитенко, Мосин, 2022], дефектоскопия обсадных колонн скважин [Сидоров, 1996; Эпов и др., 2002], картирование баженовской свиты [Никитенко и др., 2021б; Эпов и др., 2021, 2022], мониторинг резервуаров [Dutta et al., 2012], мониторинг состояния криолитозоны [Glinskikh et al., 2021] и другие. Для количественного определения электрофизических параметров исследуемой среды зарегистрированные данные инвертируются. Традиционно инверсия заключается в подборе модельных параметров так, чтобы синтетические данные соответствовали экспериментальным. Модельные параметры меняются по какому-либо правилу в зависимости от выбранного метода оптимизации, при этом на каждой итерации с помощью численного моделирования определяются синтетические данные (сигналы). Численное моделирование для МПП является затратной процедурой, поскольку сигнал во временной области обычно вычисляется с помощью обратного преобразования Фурье частотного сигнала [Ваньян, 1965], что позволяет получить высокоточный результат в широком временном диапазоне. Таким образом, по сравнению с частотным сигналом, время вычисления временного сигнала возрастает в сотни раз. Задача состоит в сокращении временных затрат при моделировании данных, чтобы инверсия производилась в реальном времени, что особенно актуально для каротажа в процессе бурения. Один из путей решения данной проблемы заключается в трансформации измеренных сигналов в частотную область [Nikitenko, 2017]. В частотной области и будет выполняться инверсия; таким образом, время инверсии сократится в сотни раз.

Трансформация в частотную область с помощью преобразования Фурье включает извлечение из сигнала первичного поля (поля в однородной среде). Это позволяет использовать для преобразования Фурье относительно небольшой, реально используемый в МПП временной интервал вместо бесконечного. Эта составляющая алгоритма особенно важна, так как запись сигнала во времени производится на ограниченном временном интервале, исключая ранние времена, где велико влияние формы импульса тока, а также поздние времена, где сигнал ниже установленного значения.

После трансформации экспериментальных данных к ним должен быть применен алгоритм инверсии, разработанный и используемый для измерений в частотной области, с целью восстановления параметров геоэлектрической модели.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СИГНАЛА В ЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ

Источниками электромагнитного поля являются катушки с током, применяемые в каротаже скважин. В приемных катушках измеряется э.д.с. в зависимости от времени.

Для трансформации э.д.с. в частотную область используется следующая формула:

$$\vec{H}^*(f) = -\frac{1}{\mu_0} \int_{t_1}^{t_n} \frac{d\vec{B}(t)}{dt} e^{i2\pi ft} dt. \quad (1)$$

Здесь $\frac{d\vec{B}(t)}{dt}$ – э.д.с., измеренная после выключения постоянного тока в генераторной катушке; $[t_1, t_n]$ – временной интервал измерений, причем время отсчитывается от момента выключения; $\vec{H}^*(f)$ – магнитное поле, зависящее от частоты f (Гц); μ_0 – магнитная проницаемость.

В случае произвольного импульса тока, уравнение (1) записывается в следующем виде:

$$\vec{H}^*(f) = -\frac{1}{i(f)} \cdot \frac{1}{i2\pi f \mu_0} \int_{t_1}^{t_n} \frac{d\vec{B}(t)}{dt} e^{i2\pi f t} dt. \quad (2)$$

Здесь $\frac{d\vec{B}(t)}{dt}$ – э.д.с. от произвольного импульса $I(t)$, $I^*(f)$ – спектр (или преобразование Фурье) токового импульса.

Сложность состоит в том, чтобы получить точное значение преобразований (1) или (2) на конечном интервале от t_1 до t_n , в то время как отрезок интегрирования при преобразовании Фурье – от нуля до бесконечности. Поведение подынтегрального выражения на отрезке $[0, t_1]$ неизвестно, за исключением того, что на нулевом времени подынтегральное выражение равно нулю. Вопрос преобразования сигнала будет рассмотрен на конкретном примере для реального трехкатушечного зонда.

Регистрируемый сигнал – это разность сигналов в двух измерительных катушках:

$$\vec{G}(t) = \frac{d\vec{B}_1(t)}{dt} - \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{d\vec{B}_2(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $\frac{d\vec{B}_1(t)}{dt}$, $\frac{d\vec{B}_2(t)}{dt}$ – э.д.с. в двухкатушечных зондах с длинами (расстояниями между источниками и приемниками) L_1 и L_2 ; M_1 и M_2 – моменты зондов, обратные к величине магнитного поля в воздухе.

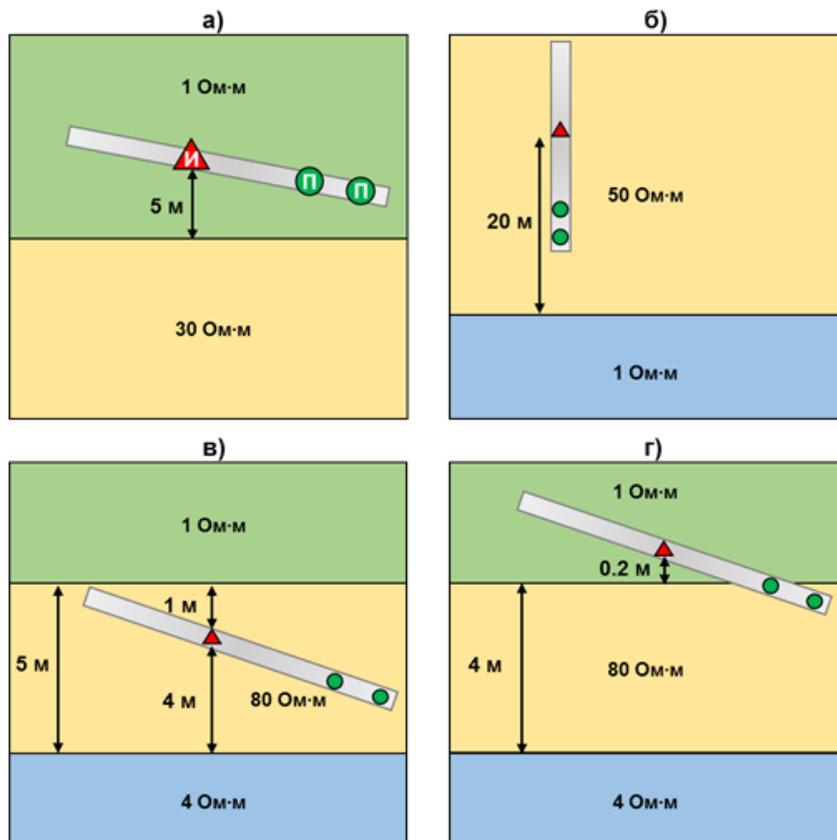


Рис. 1. Модель среды А (а): зонд находится в глинистом пласте с УЭС 1 Ом·м на расстоянии 5 м от границы с нефтенасыщенным песчаником с УЭС 30 Ом·м, $\theta = 85^\circ$. Модель среды Б (б): зонд в нефтенасыщенном песчанике с УЭС 50 Ом·м на расстоянии 20 м от границы с водонасыщенным песчаником с УЭС 1 Ом·м, $\theta = 0^\circ$. Модель среды В (в): зонд в нефтенасыщенном песчанике с УЭС 80 Ом·м на расстоянии 1 м от границы с глинистым пластом с УЭС 1 Ом·м и на расстоянии 4 м от границы с водонасыщенным песчаником с УЭС 4 Ом·м, $\theta = 80^\circ$. Модель среды Г (г): зонд пересекает границу, разделяющую нефтенасыщенный песчаник с УЭС 80 Ом·м и глинистый пласт с УЭС 1 Ом·м, расстояние до границы – 0.2 м; ниже на расстоянии 4 м находится водонасыщенный песчаник с УЭС 4 Ом·м, $\theta = 80^\circ$

Моменты не зависят от времени, и их отношение определяется выражением $\frac{M_1}{M_2} = -\left(\frac{L_2}{L_1}\right)^3$, $M_1 = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^4$.

В случае каротажа в процессе бурения с целью геонавигации, в разностном сигнале таким образом подавляется влияние бурильной колонны [Itskovich, 2018]. Аналогично в частотной области используется разностный сигнал: $\vec{F}(f) = \vec{H}_1^*(f) - \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^3 \cdot \vec{H}_2^*(f)$, чтобы компенсировать поле в воздухе.

Рассмотрим способ трансформации в частотную область на конкретных примерах. Пусть $L_1 = 7 \text{ м}$, $L_2 = 5 \text{ м}$ и $t_n = 0.5 \text{ мс}$. Моменты генераторной и приемной катушек направлены вдоль прибора или соединяющей их линии. Измеряется компонента ZZ в системе координат прибора: $F_z(f)$. Необходимо выяснить, каково максимально возможное значение t_1 , обеспечивающее требуемую точность вычисления $F_z(f)$. Рассматривается горизонтально-слоистая модель среды (рис. 1), используемая в некоторых указанных в начале работы задачах. Расстояния до границ пластов отсчитывается от генераторной катушки (источника) И, приемные катушки П находятся впереди генераторной; θ – угол наклона зонда относительно вертикали.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КАЖУЩЕГОСЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Важным вопросом является исследование поведения кажущегося сопротивления, которое вычисляется по однородной среде для $G_z(t)$. На рисунке 2 приведены кривые э.д.с. $G_z(t)$ в однородной среде на временах от 0.05 мкс до 0.5 мс.

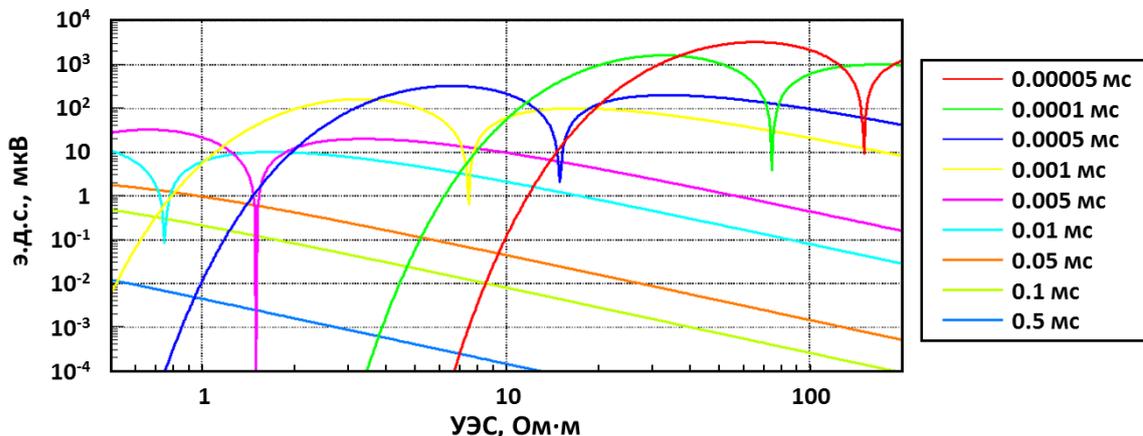


Рис. 2. Кривые э.д.с. в однородной среде в зависимости от УЭС на временах 0.00005–0.5 мс.

На временах до 0.01 мс кривые э.д.с. немонокотны в зависимости от УЭС однородной среды, изменяющегося от 0.5 до 200 Ом·м. Это значит, что на ранних временах для одного значения э.д.с. могут быть найдены несколько значений кажущегося УЭС. Поскольку кривые э.д.с. монотонны на поздних временах и, следовательно, дают только одно значение кажущегося УЭС, алгоритм вычисления истинного кажущегося УЭС в зависимости от времени состоит в следующем:

1. Последовательно вычисляются кажущиеся сопротивления, начиная с последнего временного отсчета в порядке убывания времени.
2. Когда два или более решений появляются на каком-то времени, выбирается то, которое обеспечивает монотонность кривой кажущегося УЭС, или ближайшее к кажущемуся УЭС на предыдущем времени.
3. Если решение отсутствует (такое может происходить, когда э.д.с. переходит через ноль), то и кажущееся УЭС считается не определенным.

На рисунке 3 представлена э.д.с. $G_z(t)$ и кажущееся УЭС для модели среды А (см. рис. 1) на временном интервале [5 мкс, 0.5 мс].

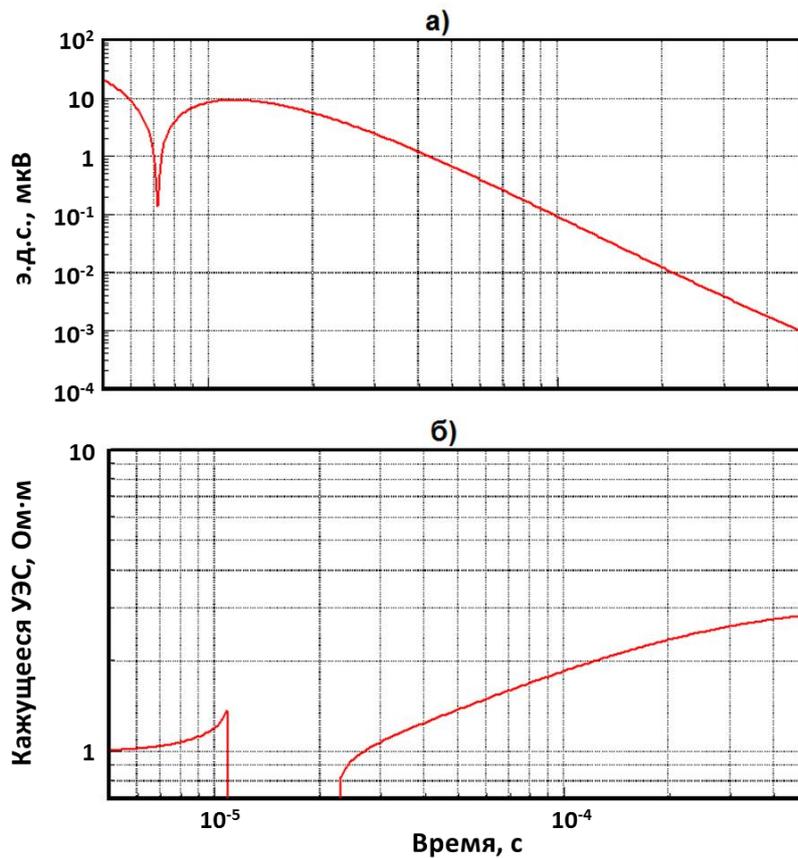


Рис. 3. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды А

Из рисунка 3 следует, что при уменьшении времени кажущееся УЭС стремится к некоторому фиксированному значению. В данном случае – это УЭС слоя, в котором находится прибор: глинистый пласт с УЭС 1 Ом·м.

ВЫЧИТАНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПОЛЯ

Попытка напрямую применить формулу (1) для определения частотно-зависимого сигнала приводит к большим ошибкам в вычисленном магнитном поле из-за недостатка, главным образом, ранних времен в отрезке интегрирования. Новый подход к вычислению Фурье-трансформации временного сигнала основан на вычитании из преобразуемого сигнала первичного поля, которое определяется как поле в однородной среде с УЭС, равным кажущемуся УЭС на первых временах регистрации. Формула преобразования имеет следующий вид:

$$\vec{H}^*(f) = \vec{H}^{*0}(f) - \frac{1}{\mu_0} \int_{t_1}^{t_n} \left(\frac{d\vec{B}(t)}{dt} - \frac{d\vec{B}^0(t)}{dt} \right) e^{i2\pi ft} dt, \quad (4)$$

где $\frac{d\vec{B}^0(t)}{dt}$ – первичное поле.

Для модели А, когда зонд находится в проводящем слое, необходимый для преобразования интервал будет меньше, так как сигнал быстро затухает.

Выбранные конструктивные параметры зонда (длины и времена регистрации) ориентированы на глубинные исследования, поэтому частотный интервал для преобразования сигнала будет соответствовать глубинным частотным измерениям: от 2 до 600 кГц.

На следующей блок-схеме (рис. 4) представлен алгоритм преобразования сигналов для последующей инверсии.



Рис. 4. Алгоритм преобразования сигналов для последующей инверсии

На рис. 5 изображено восстановленное магнитное поле $F_z(f)$ и ошибки его восстановления для модели А.

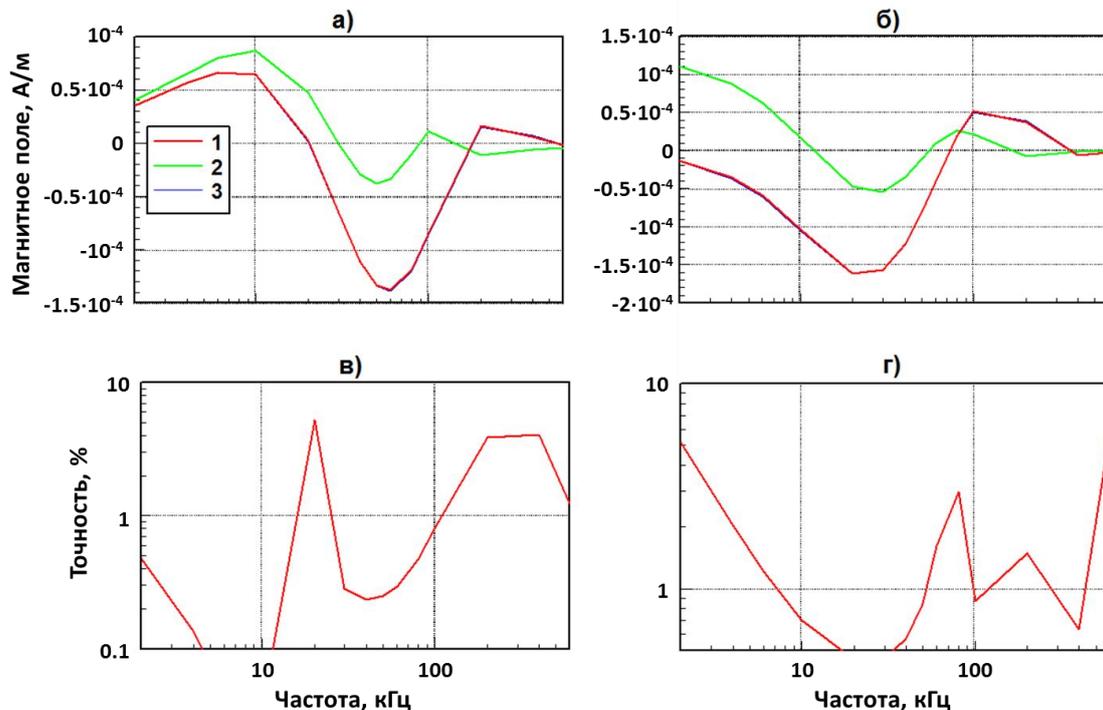


Рис. 5. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели А: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

Из рисунка 5 следует, что мнимая часть магнитного поля восстановлена с погрешностью меньше 1 %, за исключением переходов сигнала через ноль. Для реальной части погрешность меньше 1 %, за исключением также низких (<10 кГц) частот.

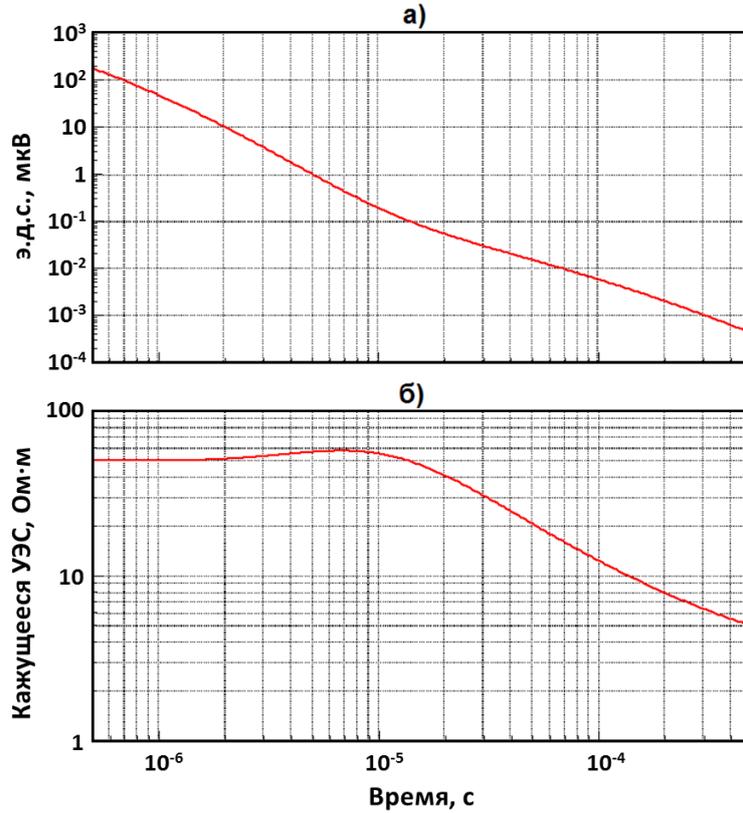


Рис. 6. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды Б

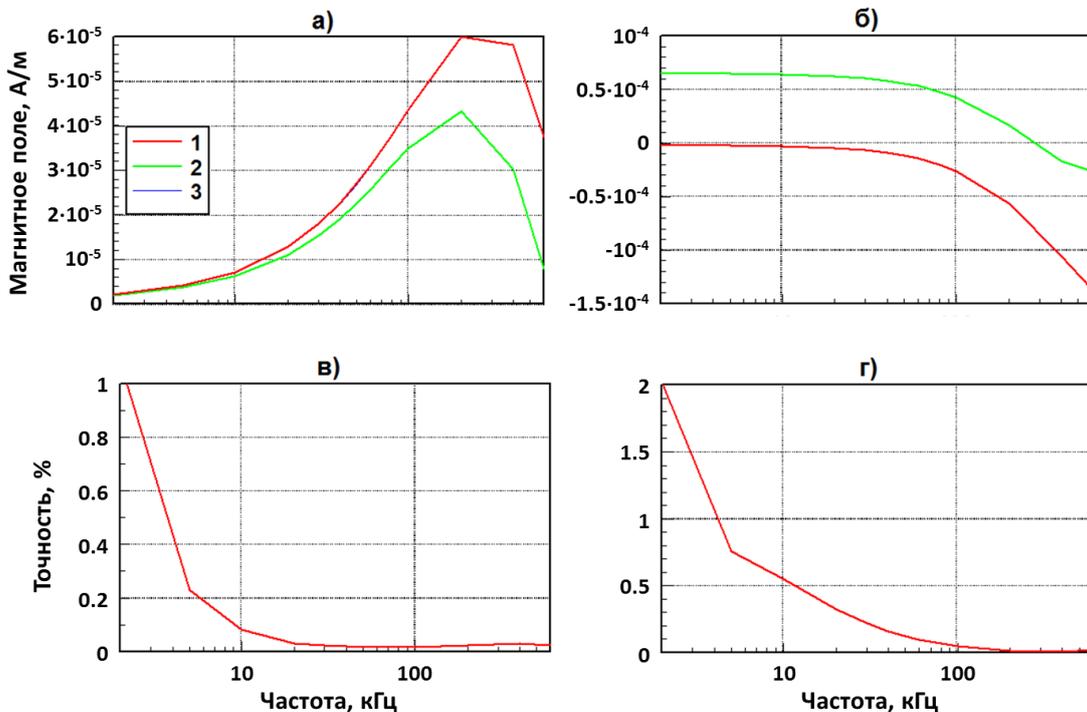


Рис. 7. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели Б: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

На рисунках 6–11 представлены э.д.с. $G_z(t)$ и кажущееся УЭС на необходимом для преобразования временном интервале, а также восстановленное магнитное поле $F_z(f)$ и ошибки восстановления для моделей Б, В и Г (см. рис. 1). Временной интервал был выбран таким образом, чтобы кажущееся УЭС стремилось к некоторому пределу при $t \rightarrow t_1$. Если зонд не пересекает границ пластов (находится целиком в пласте на достаточном расстоянии от границ), то кажущееся УЭС стремится на ранних временах к УЭС этого пласта. Это можно наблюдать на рис. 6 и 8 для моделей Б и В. Для модели Г (рис. 10), где зонд пересекает границу, кажущееся УЭС стремится на ранних временах к эффективному УЭС пространства, где находится зонд.

Точность восстановления реальной части магнитного поля (рис. 7, г) хуже по сравнению с точностью для мнимой части (рис. 7, в).

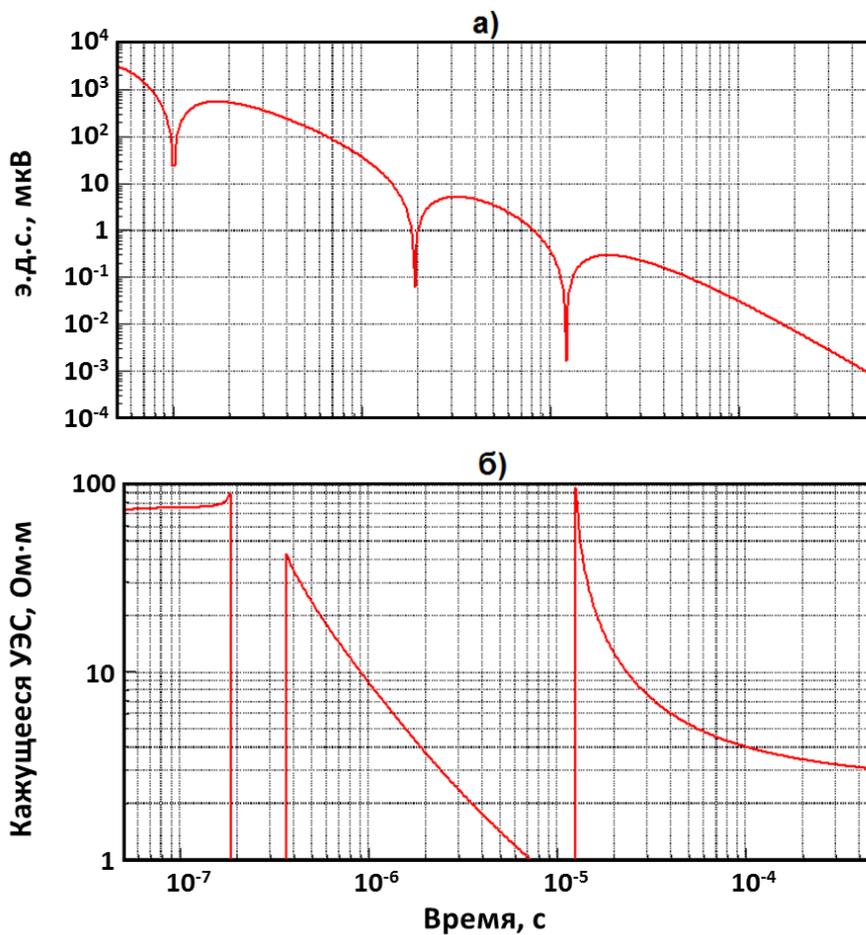


Рис. 8. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды В

Для мнимой части магнитного поля погрешность восстановления меньше 1 %, за исключением переходов сигнала через ноль (рис. 9, в). Точность восстановления реальной части неудовлетворительная (рис. 9, г). Это можно объяснить следующим образом. В формуле (4) при интегрировании для реальной части берется $\cos(2\pi ft)$. Эта функция не убывает, когда t стремится к нулю и неиспользуемый интервал $[0, t_1]$ вносит ошибку в виде аддитивной составляющей, как видно из рис. 9, б. Для модели В (и для следующей модели Г) эта составляющая достаточно велика.

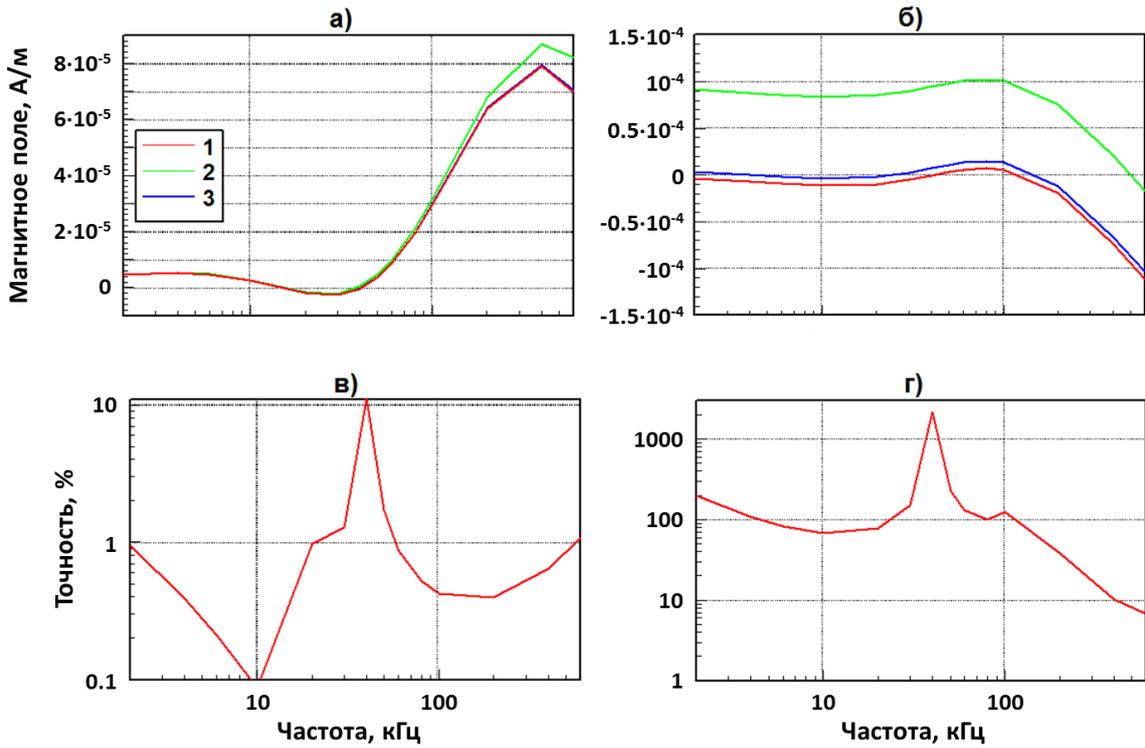


Рис. 9. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели В: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

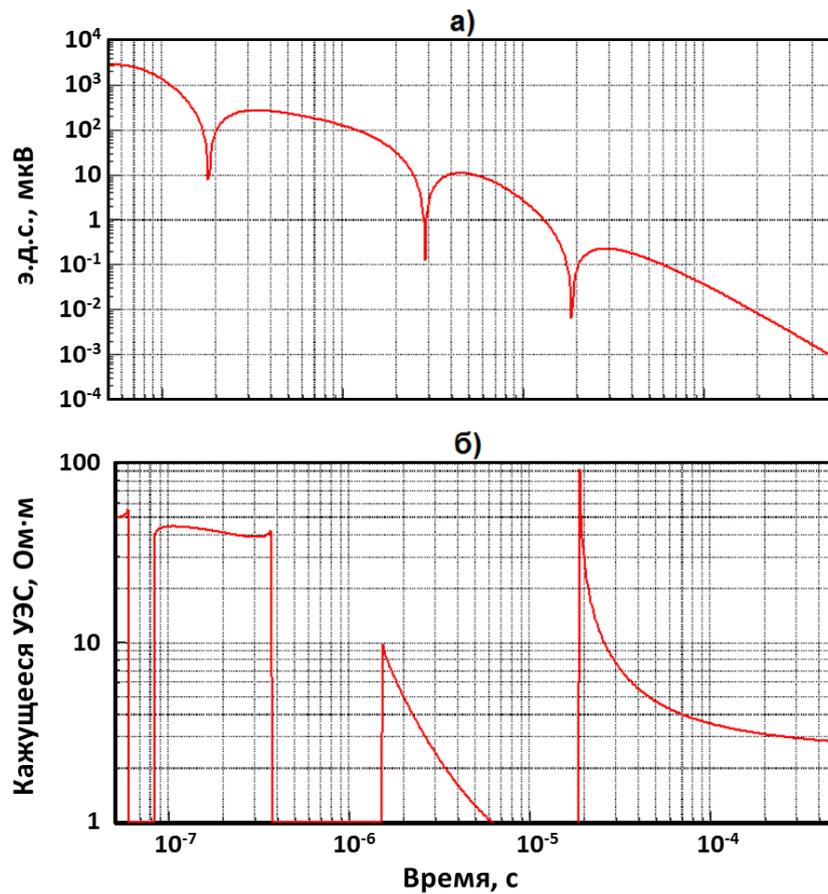


Рис. 10. Э.д.с. (а) и кажущееся УЭС (б) для модели среды Г

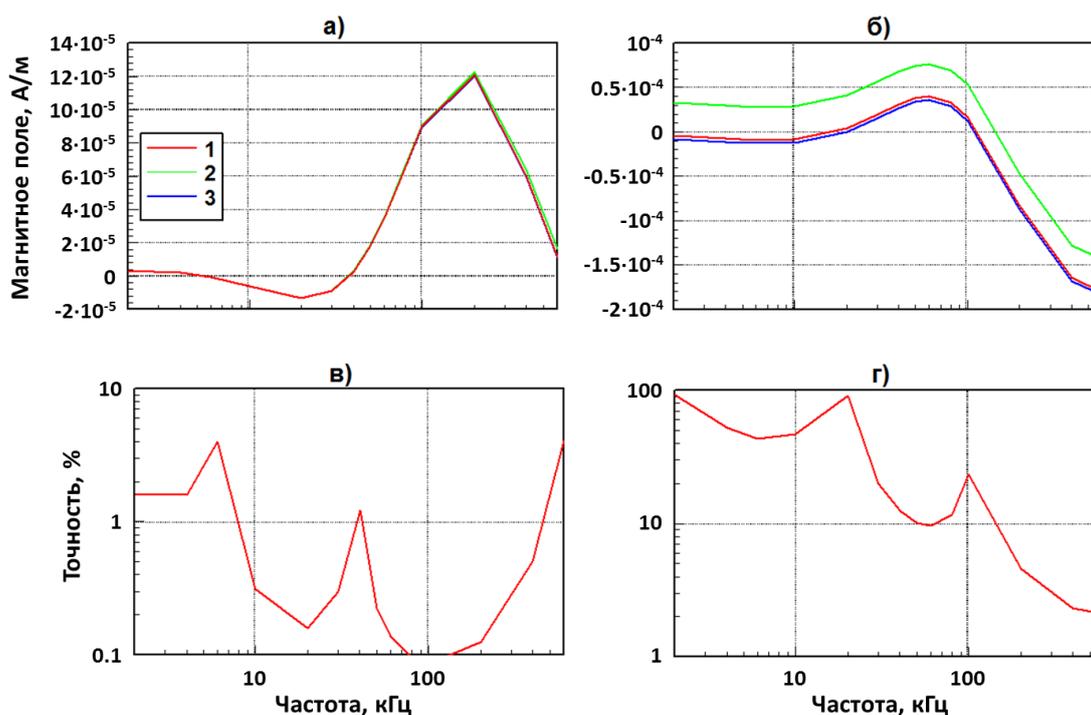


Рис. 11. Мнимая (а) и реальная (б) части магнитного поля в модели Г: 1 – истинный сигнал, 2 – восстановленный сигнал без вычитания первичного поля, 3 – восстановленный сигнал с вычитанием первичного поля. Ошибки восстановления сигнала с вычитанием первичного поля для мнимой (в) и реальной (г) части

Как и для предыдущих моделей, для мнимой части магнитного поля погрешность восстановления меньше 1 %, за исключением переходов сигнала через ноль (рис. 11, в). Точность восстановления реальной части неудовлетворительная, как и для модели В (рис. 11, г): сигналы различаются на некоторую величину.

АНАЛИЗ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ: СРАВНЕНИЕ Э.Д.С. ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ И ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В таблицах 1–4 представлены ожидаемые погрешности определения параметров моделей и угла наклона зонда относительно вертикали θ по э.д.с. и по мнимой части магнитного поля. Оценка выполнена в линейном приближении [Nardi et al., 2010]. Выбраны следующие частоты: 2, 4, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500 и 600 кГц. Использована только одна глубина. В случае нескольких глубин, чувствительность улучшается. Пусть систематическая ошибка составляет 0.5 % для э.д.с. и 1 % для магнитного поля (с учетом дополнительной ошибки при преобразовании сигнала).

Таблица 1

Погрешности определения параметров для модели А

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС глинистого пласта	1 Ом·м	0.34 %	0.005 %
УЭС нефтенасыщенного песчаника	30 Ом·м	16 %	40 %
Расстояние до границы	5 м	0.28 м	0.32 м
θ	85°	3.6°	3.9°

Таблица 2

Погрешности определения параметров для модели Б

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС нефтенасыщенного песчаника	50 Ом·м	0.52 %	1.3 %
УЭС водонасыщенного песчаника	1 Ом·м	2.1 %	6.5 %
Расстояние до границы	20 м	0.07 м	0.7 м
θ	0°	6.2°	3.6°

Таблица 3

Погрешности определения параметров для модели В

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС глинистого пласта	1 Ом·м	0.62 %	1.7 %
УЭС нефтенасыщенного песчаника	80 Ом·м	0.16 %	2.7 %
УЭС водонасыщенного песчаника	4 Ом·м	2.5 %	5.6 %
Расстояние до верхней границы	1 м	0.013 м	0.031 м
Расстояние до нижней границы	4 м	0.15 м	0.27 м
θ	80°	0.33°	0.33°

Таблица 4

Погрешности определения параметров для модели Г

Параметр	Истинное значение	Погрешности	
		Временная область	Частотная область
УЭС глинистого пласта	1 Ом·м	0.41 %	1.7 %
УЭС нефтенасыщенного песчаника	80 Ом·м	1.2 %	4.5 %
УЭС водонасыщенного песчаника	4 Ом·м	3.1 %	7.8 %
Расстояние до верхней границы	1 м	0.003 м	0.005 м
Расстояние до нижней границы	4 м	0.056 м	0.32 м
θ	80°	0.18°	0.58°

Представленные в табл. 1–4 результаты свидетельствуют о том, что в целом чувствительность частотно-зависимых сигналов к параметрам среды несколько хуже, чем для временных измерений, но является достаточно хорошей для уверенной оценки УЭС пластов, расстояний до границ, а также угла наклона зонда. Тестовые инверсии подтверждают это утверждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый метод инверсии данных зондирования МПП. Он состоит в трансформации измеренных сигналов в частотную область и применении к ним алгоритма инверсии, разработанного и используемого для частотной области, с целью определения параметров исследуемой среды. Этот метод позволяет существенно снизить время вычислений – так, что инверсия будет проводиться в реальном времени. Важной особенностью метода является вычитание первичного поля из измеренной э.д.с. Это дает возможность использования относительно небольшого временного интервала для преобразования Фурье и восстановления частотного сигнала с хорошей точностью.

Следующие выводы справедливы для реального глубинного зонда с расстояниями между генераторными и приемными катушками до 10 м:

- чтобы восстановить мнимую часть магнитного поля в частотном диапазоне от 2 до 600 кГц, соответствующем глубинным исследованиям, в общем случае необходимы времена измерения от 0.05 мкс до 0.5 мс (4 порядка);

- в проводящей среде временной интервал сокращается и может составлять 2 порядка: от 5 мкс до 0.5 мс;

- для инверсии в частотной области необходимо выбирать мнимую часть магнитного поля вне ее переходов через ноль.

Показано, что разрешающая способность преобразованных сигналов сравнима с разрешающей способностью исходных сигналов. Метод применим для диагональных компонент поля XX , YY и ZZ . Для перекрестных компонент поле в однородной среде равно нулю, и способ трансформации их в частотную область должен быть модифицирован на основе детального численного анализа поведения сигналов в базовых моделях.

Разработанный компьютерный алгоритм быстрой инверсии будет применяться, прежде всего, для решения актуальной проблемы экологического мониторинга состояния многолетнемерзлых пород на основе импульсных электромагнитных зондирований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 «Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны», <https://rscf.ru/project/22-17-00181/>.

ЛИТЕРАТУРА

Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. – М.: Недра, 1965. – 105 с.

Никитенко М.Н., Мосин А.П. Методы сжатия данных прибора каротажа в процессе бурения методом переходных процессов // Геофизические технологии. – 2022. – № 1. – С. 4–16, doi: 10.18303/2619–1563–2022–1–4.

Никитенко М.Н., Рабинович М.Б., Свиридов М.В. Определение элементов залегания пластов по данным каротажа в процессе бурения методом переходных процессов // Геофизические технологии. – 2021а. – № 2. – С. 36–48, doi: 10.18303/2619-1563-2021-2-36.

Никитенко М.Н., Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Импульсные электромагнитные зондирования баженовской свиты из нижнемеловых и юрских коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // EAGE Геомодель 2021 (г. Геленджик, 6–10 сентября 2021): Тезисы докладов. – Геленджик, 2021б. – С. 59.

Сидоров В.А. Скважинные дефектоскопы-толщиномеры для исследования многоколонных скважин // Каротажник. – 1996. – № 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., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Новый метод импульсного электромагнитного каротажного зондирования: картирование баженовской свиты из юрских коллекторов, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 3 (47). – С. 31–39.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Петров А.М., Горносталев Д.И., Михайлов И.В. Межскважинное импульсное электромагнитное просвечивание баженовской свиты из нижнемеловых и верхнеюрских коллекторов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 1 (49). – С. 73–79.

Bespalov A., Rabinovich M., Tabarovskiy 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.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // Geosciences. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 1–15, doi: 10.3390/geosciences11020060.

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.

Nardi G., Martakov S., Nikitenko M., Rabinovich M. Evaluation of parameter uncertainty utilizing resolution analysis in reservoir navigation increases the degree of accuracy and confidence in well-bore placement // The SPWLA 51st Annual Logging Symposium (Perth, Australia, June 19–23, 2010): Transactions. – Perth, 2010. – SPWLA-2010-78038.

Nikitenko M. Apparatus and method for downhole transient resistivity measurement and inversion // US Patent No. 9841527, publ. December 12, 2017.

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, doi: 10.4043/15126-MS.

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.

REFERENCES

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., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. New method of pulsed electromagnetic logging sounding: mapping the Bazhenov Formation from Jurassic reservoirs penetrated by inclined-horizontal wells // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. – 2021. – No. 3 (47). – P. 31–39.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. Cross-well pulsed electromagnetic exploration of the Bazhenov Formation from Lower Cretaceous and Upper Jurassic reservoirs // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. – 2022. – Vol. 1 (49). – P. 73–79.

Glinskikh V., Nechaev O., Mikhaylov I., Danilovskiy K., Olenchenko V. Pulsed electromagnetic cross-well exploration for monitoring permafrost and examining the processes of its geocryological changes // *Geosciences*. – 2021. – Vol. 11 (2). – P. 1–15, doi: 10.3390/geosciences11020060.

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.

Nardi G., Martakov S., Nikitenko M., Rabinovich M. Evaluation of parameter uncertainty utilizing resolution analysis in reservoir navigation increases the degree of accuracy and confidence in well-bore placement // *The SPWLA 51st Annual Logging Symposium (Perth, Australia, June 19–23, 2010): transactions*. – Perth, 2010. – SPWLA-2010-78038.

Nikitenko M. Apparatus and method for downhole transient resistivity measurement and inversion // US Patent No. 9841527, publ. December 12, 2017.

Nikitenko M.N., Mosin A.P. Methods of transient EM data compression // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2022. – Vol. 1. – P. 4–16, doi: 10.18303/2619–1563–2022–1–4.

Nikitenko M.N., Rabinovich M.B., Sviridov M.V. Determination of formation dip and strike from transient LWD electromagnetic measurements // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2021a. – Vol. 2. – P. 36–48, doi: 10.18303/2619-1563-2021-2-36.

Nikitenko M.N., Epov M.I., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V., Gornostalev D.I., Mikhaylov I.V. Transient Electromagnetic Sounding of Bazhenov Formation from Lower Cretaceous and Jurassic Reservoirs Penetrated by Deviated and Horizontal Wells // *EAGE Geomodel 2021 (Gelendzhik, September 6–10, 2021): Extended abstracts*. – Gelendzhik, 2021b. – P. 59.

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, doi: 10.4043/15126-MS.

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

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.

Vanyan L.L. *Fundamentals of Electromagnetic Sounding* [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1965. – 105 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НИКИТЕНКО Марина Николаевна – доктор технических наук, ведущий 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.

*Статья поступила в редакцию 18 июля 2022 г.,
принята к публикации 7 октября 2022 г.*