

REDUCING THE MAGNETIC VISCOSITY EFFECT ON TEM SOUNDING DATA**M.V. Sharlov** ¹✉, **N.O. Kozhevnikov** ², **E.Yu. Antonov** ²¹ SIGMA-GEO LLC, 6 Zvezdinskaya St, Irkutsk 664039, Russia² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. Siberian Traps magnetic viscosity affects and makes it difficult to interpret TEM sounding data obtained during oil and gas exploration in the south of the Siberian platform. In this paper, we present and discuss a method for decreasing magnetic viscosity effect on TEM data. The method is based on estimating magnetic viscosity contribution to the total transient response using TEM data measured with multi-offset arrays.

KEY WORDS: magnetic viscosity; TEM sounding method; Siberian platform; traps

RESEARCH ARTICLE**Correspondence:** Maxim V. Sharlov, sharlov@sigma-geo.ru

Received: August 5, 2021

Revised: September 8, 2021

Accepted: September 13, 2021

FOR CITATION: Sharlov M.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., 2021. Reducing the magnetic viscosity effect on tem sounding data. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3s), 703–714. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0548

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

М.В. Шарлов¹, Н.О. Кожевников², Е.Ю. Антонов²

¹ ООО «СИГМА-ГЕО», 664039, Иркутск, ул. Звездинская, 6, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Проявления магнитной вязкости пород трапповой формации на юге Сибирской платформы осложняют данные, полученные методом зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопроисловых задач. С целью повышения информативности и достоверности данных нестационарных электромагнитных зондирований в условиях проявления эффектов магнитной вязкости предложен подход для снижения влияния магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики. Подход основан на определении вклада, который релаксация намагниченности вносит в суммарную переходную характеристику за счет использования результатов измерений многообразными установками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитная вязкость; зондирования становлением поля в ближней зоне; Сибирская платформа; траппы

1. ВВЕДЕНИЕ

Сибирская платформа является территорией, перспективной с точки зрения обнаружения здесь значительных запасов углеводородов. Это обуславливает проведение геолого-геофизических исследований, в том числе методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ).

В рассматриваемом регионе основным объектом при поисках нефти и газа являются отложения нижней (терригенной) части подсолевого комплекса (ванаварская свита венда) [Shemin, 2007]. Кроме того, из отложений вендско-нижнекембрийского комплекса также получены различные по интенсивности нефтегазопроисловения. Открыт ряд месторождений нефти и газа, крупнейшими из которых являются Верхнечонское, Ярактинское, Ковыктинское, Ванкорское, Юрубчено-Тохомское и др. Основными объектами изучения являются резервуары рифея, а также нижневанаварский, верхневанаварский и оскобинский.

Наземными геофизическими исследованиями на севере Иркутской области и в Красноярском крае изучается разрез, осложненный влиянием траппового магматизма позднепалеозойско-раннемезозойского времени [State Geological Map..., 2012; Bitner, Pozdnyakov, 2017].

Излившаяся на поверхность туфоловая толща, а также интрузии траппов осложняют волновую картину, полученную с помощью сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ), в результате чего снижается качество структурных построений.

Одной из особенностей пород трапповой формации является магнитная вязкость (МВ). Индукционные переходные характеристики, измеренные на участках, где присутствуют породы трапповой формации, как правило, осложнены влиянием магнитной вязкости, которое выражается в аномальном замедлении спада ЭДС на поздних временах [Kozhevnikov et al., 2016].

Это затрудняет или делает невозможным изучение глубинного строения геологического разреза. В связи с этим одной из актуальных задач при постановке геофизических исследований в этом регионе является разработка способов обработки материалов ЗСБ, позволяющих ослабить влияние магнитной вязкости.

В данной статье мы, основываясь на результатах математического моделирования, описываем новый подход, позволяющий ослабить влияние магнитной вязкости и за счет этого улучшить интерпретацию данных глубинных ЗСБ.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Туфоловая толща пермо-триасового возраста в районе исследований (зона сочленения Катангской, Присяяно-Енисейской и Непско-Ботуобинской нефтегазонасных областей) представлена лавовыми и пирокластическими образованиями различной мощности [State Geological Map..., 2012]. В разрезе туфолов выделяются различные по составу и структуре базальты и горизонты туфов, туффитов и туфобрекчий. Базальтовые туфы, входящие в состав трапповой формации, характеризуются неоднородностью строения, наличием линз и неправильных участков различного гранулометрического состава. Эта толща сформировалась в поздней перми и триасе. Она вскрыта большинством глубоких скважин и скважин колонкового бурения.

Большинство базитов эффузивной фации представлены долеритами и базальтами. Внедрившиеся в осадочный чехол в период триасовой активизации магматической деятельности интрузивные тела занимают стратиграфические уровни от тэтэрской свиты венда – нижнего кембрия до триаса включительно. Основная их масса приурочена к верхней части разреза (ВЧР), преимущественно к верхнепалеозойским и триасовым отложениям. В меньшей степени интрузивной

деятельностью затронуты галогенно-карбонатные породы литвинцевской и ангарской свит; еще реже пластовые интрузии встречаются в усольской свите, очень редко – в тэтэрской. Интрузии отсутствуют в бельской свите, а также в разрезе венда и рифея [Bitner, Pozdnyakov, 2017].

Для описываемого разреза характерны зоны контактовых изменений – повышенной трещиноватости, с которыми связаны интенсивные поглощения и водопроявления при бурении глубоких скважин. Встречаются последствия вымывания солей галогенно-карбонатного разреза термальными растворами, сопровождавшими внедрение магмы.

3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Магнитная вязкость – одно из проявлений ферромагнетизма. В индуктивной электроразведке эффекты магнитной вязкости обычно связаны с релаксацией намагниченности присутствующих в горных породах ультрадисперсных частиц ферромагнитных минералов – явлением суперпарамагнетизма (СПМ) [Buselli, 1982; Kamnev et al., 2015].

Влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики проявляется в виде аномально

медленно спадающей ЭДС_{МВ}, скоростью убывания которой от времени определяется функцией вида t^b , где показатель степени b близок к -1.

На поздних временах влияние магнитной вязкости на результирующую индукционную характеристику горных пород с высоким содержанием СПМ-частиц становится заметным или даже преобладающим по сравнению с вкладом вихревых токов, зависящим от электропроводности среды.

Как известно [Kozhevnikov, Antonov, 2008; Kozhevnikov et al., 2012], становление вихревых токов и релаксация намагниченности протекают независимо. Это означает, что для этих процессов выполняется принцип суперпозиции (рис. 1): результирующая ЭДС в приемной петле представляет сумму ЭДС, индуцированных релаксацией намагниченности и вихревыми токами.

В случае горизонтально-слоистой среды для соосной установки полярность ЭДС_{МВ} совпадает с полярностью ЭДС, индуцируемой вихревыми токами. Однако для разносенной установки полярность ЭДС_{МВ} противоположна полярности ЭДС, создаваемой за счет «нормального» индукционного становления. Для разносенной установки увеличение расстояния между питающей и приемной петлями снижает проявление магнитной вязкости, так как при этом уменьшается

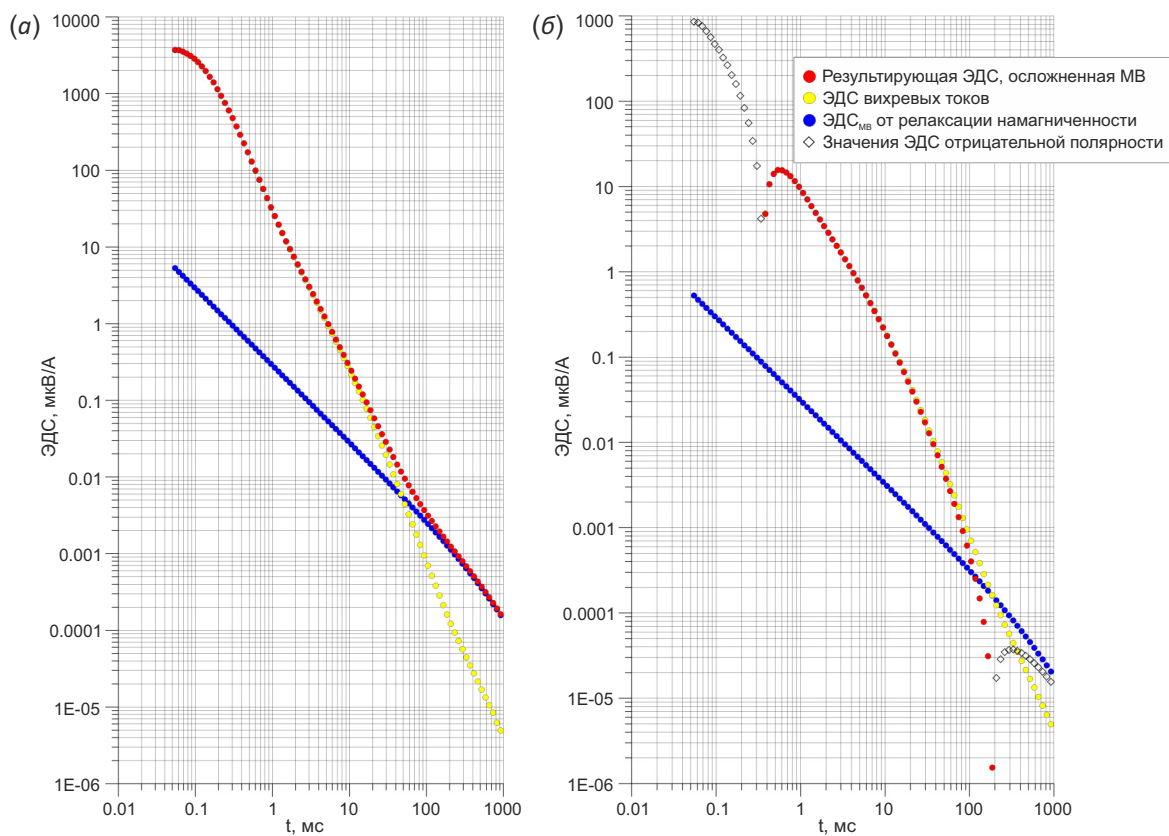


Рис. 1. Результирующая ЭДС, представляющая сумму ЭДС_{МВ} и ЭДС, создаваемую вихревыми токами: (а) – соосная, (б) – разносенная установки.

Fig. 1. Total TEM response equal to the sum of the EMF_{МВ} (due to magnetic viscosity), and of the EMF due to the eddy currents decay. TEM array: (а) – central loop, (б) – separate loops.

взаимная индуктивность между генераторной и приемной петлями [Kozhevnikov, Antonov, 2008, 2018].

4. ИЗВЕСТНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Обычно в методе ЗСБ проявление магнитной вязкости рассматривают как геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию переходных характеристик в терминах «нормальной» электропроводности. Так, при работе симметричными установками формальная интерпретация медленно убывающей ЭДС приводит к появлению не существующих в реальности слоев очень низкого удельного сопротивления [Emerson, 1980].

Известны способы, позволяющие снизить или учесть влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики. Один из них [Zakarkin, Bubnov, 1995] заключается в том, что для изучения верхней части геологического разреза используются данные соосной установки, а для изучения глубинного строения – установки с разнесенными петлями. Недостатком способа является типичная для несимметричных установок проблема, связанная с неопределенностью точки записи.

Другой способ [Stognii et al., 2010] основан на принципе геометрического зондирования. Измерив на одном месте переходные процессы с помощью установок разных размеров, можно наряду с распределением электропроводности с глубиной найти вертикальное распределение параметров, характеризующих магнитную вязкость.

Одним из недостатков, присущих обоим способам, является необходимость в сложной системе наблюдений. Это влечет увеличение стоимости съемок, что препятствует массовому использованию этих способов в производственных работах.

5. СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МНОГОРАЗНОСНЫХ УСТАНОВОК

При постановке нефтегазопоисковых исследований методом ЗСБ широко используются многоразносные установки, с помощью которых от одного источника регистрируются сигналы, индуцируемые в соосной и нескольких выносных приемных петлях (рис. 2). Выносные приемные петли характеризуются разнесением – расстоянием между центрами генераторной и приемной петель.

По сравнению с традиционной, многоразносная установка обеспечивает более высокую производительность и плотность наблюдений, возможность диагностировать и интерпретировать данные ЗСБ с проявлениями индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) или магнитной вязкости [Kompaniets, Kozhevnikov, 2018; Buddo, Pospeev, 2019].

На рис. 3 приведены полевые кривые кажущегося сопротивления $\rho_r(t)$, осложненные влиянием магнитной вязкости.

В случае горизонтально-слоистой проводящей немагнитной среды переходные характеристики для соосной и выносной установок сближаются на поздних временах [McNeill, 1980]. Как уже упоминалось, ЭДС_{МВ}, индуцируемая релаксацией намагниченности, в выносных приемных петлях по сравнению с соосной тем меньше, чем больше расстояние между центрами генераторной и приемной петель. Поэтому результирующая ЭДС, измеренная при максимальном разнесе, меньше всего осложнена влиянием МВ и ее можно использовать в качестве референтной. Красная кривая на рис. 3 измерена при разнесе 1000 м. По сравнению с кривыми $\rho_r(t)$, измеренными при меньших разнесах, влияние МВ при большом разнесе ослаблено и становится заметным на более позднем времени. Очевидно, результирующую ЭДС, измеренную при разнесе 1000 м, логично использовать как референтную. Значения $\rho_r(t)$ для соосной приемной петли (синяя кривая на рис. 3) на времени более 100 мс занижены относительно референтных, тогда как для выносной приемной петли с разнесом 500 м (зеленая кривая на рис. 3) – завышены вследствие влияния магнитной вязкости.

Для того чтобы выяснить, при каком разнесе ЭДС может считаться референтной, мы рассчитали расхождение между ЭДС для горизонтально-слоистой проводящей среды и для среды, которая отличается от исходной тем, что является не только проводящей, но и магнитовязкой. Расчеты производились для разнесов 1000 и 1500 м. Рис. 4 иллюстрирует расхождение между ЭДС для горизонтально-слоистой проводящей среды с учетом и без учета МВ (разнос 1000 м (рис. 4, а) и 1500 м (рис. 4, б)).

Типичные геоэлектрические модели с различным уровнем магнитной вязкости, характерные для одного из изучаемых участков, приведены в табл. 1, 2, 3. Для оценки влияния магнитной вязкости на разнесенные установки были использованы расчеты для геоэлектрической модели с наибольшим значением комплексной, частотно-зависимой магнитной восприимчивости (параметры модели приведены в табл. 3).

На поздних временах относительное расхождение между ЭДС для разнеса 1000 м достигает 50 %, тогда как для разнеса 1500 м оно составляет менее 10 %. Это

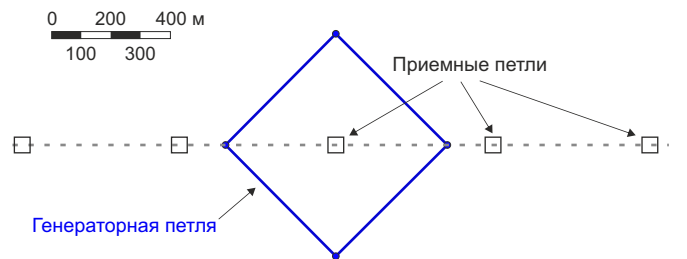


Рис. 2. Схема многоразносной установки ЗСБ: генераторная петля размером 500×500 м; приемные петли с разнесом 0, 500 и 1000 м.

Fig. 2. Multi-offset TEM array with 500 by 500 m transmitter loop. Receiving loops spaced by 0, 500 and 1000 m apart.

позволяет рассматривать ЭДС, измеренную при разnose 1500 м, в качестве референтной. На практике для измерения при разносах более 1500 м потребовалось бы значительное увеличение трудозатрат и стоимости полевых работ, поэтому мы рассматриваем разнос 1500 м в качестве оптимального.

Для снижения влияния магнитной вязкости мы использовали подход, заключающийся в расчете ЭДС_{МВ} (см. рис. 1) с последующим ее вычитанием из наблюдаемых переходных характеристик на всех разносах,

за исключением референтных. Этот подход основывается на следующих положениях:

1. ЭДС_{МВ} является аддитивной по отношению к ЭДС, индуцируемой вихревыми токами.
2. ЭДС_{МВ} убывает обратно пропорционально времени: ЭДС_{МВ} ∝ 1/t.
3. Вклад релаксации намагниченности в результирующую ЭДС, индуцируемую в приемной петле, минимален при максимальном разnose. Поэтому ЭДС, измеренная при максимальном разnose, используется как

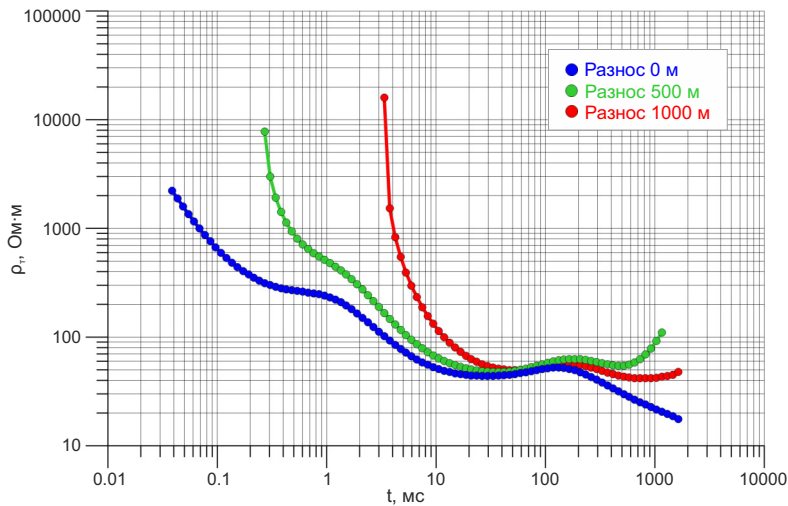


Рис. 3. Кривые $\rho_t(t)$ с различной степенью проявления магнитной вязкости в зависимости от разноса.
Fig. 3. The effect of receiving loop spacing on magnetic viscosity manifestation on TEM apparent resistivity curves $\rho_t(t)$.

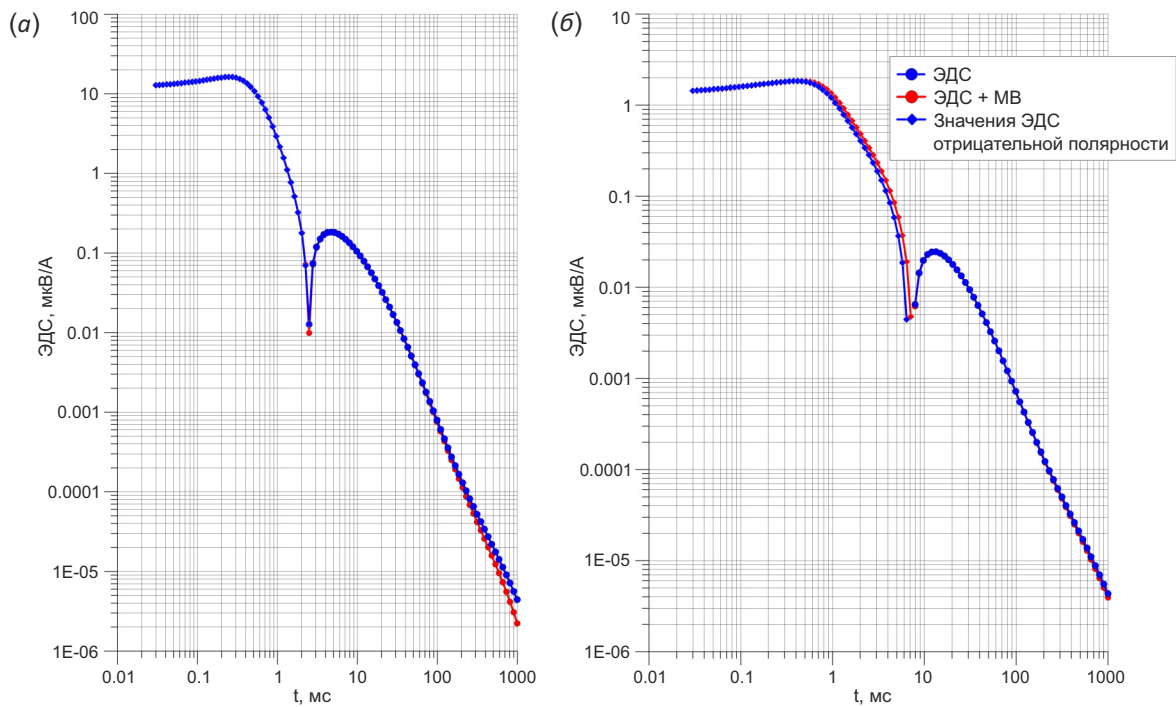


Рис. 4. Синтетические переходные характеристики для горизонтально-слоистой проводящей среды без проявления и с проявлением магнитной вязкости. Разнос: (а) – 1000 м; (б) – 1500 м.
Fig. 4. Calculated TEM voltage responses for a horizontally-layered, conductive ground without and with magnetic viscosity. Spacing: (а) – 1000 m, (б) – 1500 m.

Таблица 1. Параметры геоэлектрической модели M1
Table 1. Parameters of geoelectric model M1

№ слоя	H, м	ρ , Ом·м	$\Delta\kappa$, ед. СИ
1	80	75	$3 \cdot 10^{-3}$
2	200	120	0
3	200	23	0
4	200	20	0
5	320	70	0
6	1400	120	0
7	880	80	0
8	1720	17	0
9	1500	35	0

Таблица 2. Параметры геоэлектрической модели M2
Table 2. Parameters of geoelectric model M2

№ слоя	H, м	ρ , Ом·м	$\Delta\kappa$, ед. СИ
1	70	80	0
2	250	125	10^{-2}
3	240	34.5	0
4	480	47	0
5	1400	73	0
6	760	60	0
7	1720	17	0
8	1580	27	0

Таблица 3. Параметры геоэлектрической модели M3
Table 3. Parameters of geoelectric model M3

№ слоя	H, м	ρ , Ом·м	$\Delta\kappa$, ед. СИ
1	70	80	0
2	250	125	$3 \cdot 10^{-2}$
3	240	34.5	0
4	480	47	0
5	1400	73	0
6	760	60	0
7	1720	17	0
8	1580	27	0

референтная для определения и последующего вычитания ЭДС_{МВ} из результирующей ЭДС, измеренной при меньшем разносе.

4. Геоэлектрическая модель изучаемой среды близка к горизонтально-слоистой.

Алгоритм обработки данных многоразностной установки, реализующий рассматриваемый подход, является частью программного пакета TEM-Processing [Sharlov et al., 2018]. Алгоритм заключается в подборе параметров ЭДС_{МВ} для каждого из разносов установки таким образом, чтобы на поздних временах при вычитании этой ЭДС_{МВ} из измеренной на данном разносе

среднеквадратичное расхождение между разностной и референтной (на максимальном разносе) ЭДС было минимальным.

Поскольку длительность импульсов тока в генераторной петле влияет на скорость убывания ЭДС_{МВ} [Dabas, Skinner, 1993], расчет ЭДС_{МВ} выполняется с учетом этой длительности. В ходе расчета определяются такие параметры, как полярность ЭДС_{МВ} и ее начальное (при $t \rightarrow 0$) значение, а также уточняется показатель степени в функции, характеризующей скорость убывания ЭДС_{МВ} [Kamnev et al., 2015].

Функция ЭДС_{МВ}(t) гладкая и монотонно убывающая. Если параметры функции определены правильно, ее вычитание из измеренной ЭДС снижает (в идеальном случае полностью устраняет) вклад магнитной вязкости. Поэтому, используя разностную переходную характеристику, можно определить глубинное распределение электропроводности.

6. ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Для верификации работы алгоритма мы провели численный эксперимент. Он включал: расчет переходных характеристик с учетом магнитной вязкости для нескольких геоэлектрических моделей, определение магнитовязкой составляющей суммарного сигнала, вычитание этой составляющей из результирующей переходной характеристики, инверсию разностной ЭДС на основе модели горизонтально-слоистой проводящей среды, сопоставление найденной таким образом модели с исходной.

Способ расчета индукционных переходных характеристик основан на решении краевой задачи уравнения Гельмгольца для источника, расположенного на поверхности горизонтально-слоистой проводящей магнитовязкой среды. Решение отыскивается в частотной области, после чего осуществляется трансформация во временную область [Kozhevnikov, Antonov, 2008]. Влияние магнитной вязкости учитывается путем использования комплексной, частотно-зависимой магнитной восприимчивости [Chikazumi, Charap, 1978; Lee, 1984]

$$\kappa(\omega) = \Delta\kappa \left[1 - \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \cdot \ln \frac{1 + j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_1} \right],$$

где ω – круговая частота, $j = (-1)^{1/2}$; τ_1 , τ_2 – нижняя и верхняя границы диапазона времен релаксации; $\Delta\kappa$ – разница между значениями магнитной восприимчивости на низкой ($\omega \ll 1/\tau_2$) и высокой ($\omega \gg 1/\tau_1$) частотах. При выполнении расчетов было принято, что $\tau_1 = 10^{-6}$ с, $\tau_2 = 10^6$ с.

На первом этапе численного эксперимента Н.О. Кожевников сформировал три исходные модели (далее – модели M1, M2 и M3) с удельными сопротивлениями и параметрами магнитной вязкости, типичными для одной из площадей исследований. Параметры исходных моделей приводятся в табл. 1, 2 и 3.

После этого Е.Ю. Антонов, воспользовавшись написанной им специальной программой, рассчитал модельные переходные характеристики с учетом магнитной вязкости. Для каждой из трех моделей переходные характеристики рассчитывались для трех разносов: 0, 500 и 1500 м. Переходные характеристики для разноса 1500 м как наименее подверженные влиянию магнитной вязкости при дальнейшей обработке использовались в качестве референтных.

Для учета влияния погрешностей измерения на эффективность алгоритма к модельным данным добавлялись полевые записи электромагнитных помех. Затем М.В. Шарлов с помощью стандартного графа программы TEM-Processing обработал эти данные. В результате были построены квазиэкспериментальные переходные характеристики, осложненные влиянием магнитной вязкости. Они приведены на рис. 5, а, б, а и 7, а для моделей М1, М2 и М3 соответственно.

Следующий шаг заключался в обработке осложненных квазиэкспериментальных переходных характеристик с помощью алгоритма для снижения влияния магнитной вязкости. На рис. 5, б, 6, б и 7, б показаны переходные характеристики для моделей М1, М2 и М3, полученные путем вычитания ЭДС_{МВ} из результирующих переходных характеристик.

На рис. 5, 6 и 7 видно, что степень проявления магнитной вязкости зависит от модели. Для моделей М2

и М3 на поздних временах при разносе 500 м наблюдается смена знака ЭДС (кривые зеленого цвета на рис. 6, а и 7, а).

Независимо от степени проявления магнитной вязкости с помощью верифицируемого алгоритма удалось определить ЭДС_{МВ}, после вычитания которой из суммарной ЭДС переходные характеристики на поздних временах на всех разносах сближаются, что свидетельствует о снижении влияния магнитной вязкости.

На следующем этапе М.В. Шарлов, в рамках модели горизонтально-слоистой проводящей среды, выполнил инверсию «освобожденных» от влияния магнитной вязкости индукционных переходных характеристик. При этом интерпретатор не располагал априорной информацией об исходных геоэлектрических моделях. Данные для соосной установки и установки с разносом 500 м интерпретировались независимо; инверсия данных для разноса 1500 м не проводилась, так как данный разнос являлся референтным. Исходные и восстановленные геоэлектрические модели приведены на рис. 8.

Среднеквадратическое отклонение между модельными и разностными ЭДС составляет 0.5–0.6 %. Мощности слоев, найденные в результате инверсии, несколько отличаются от мощностей слоев исходных моделей. Однако положение кровли двух проводящих горизонтов (на глубинах около 300 и 3200 м) определено с

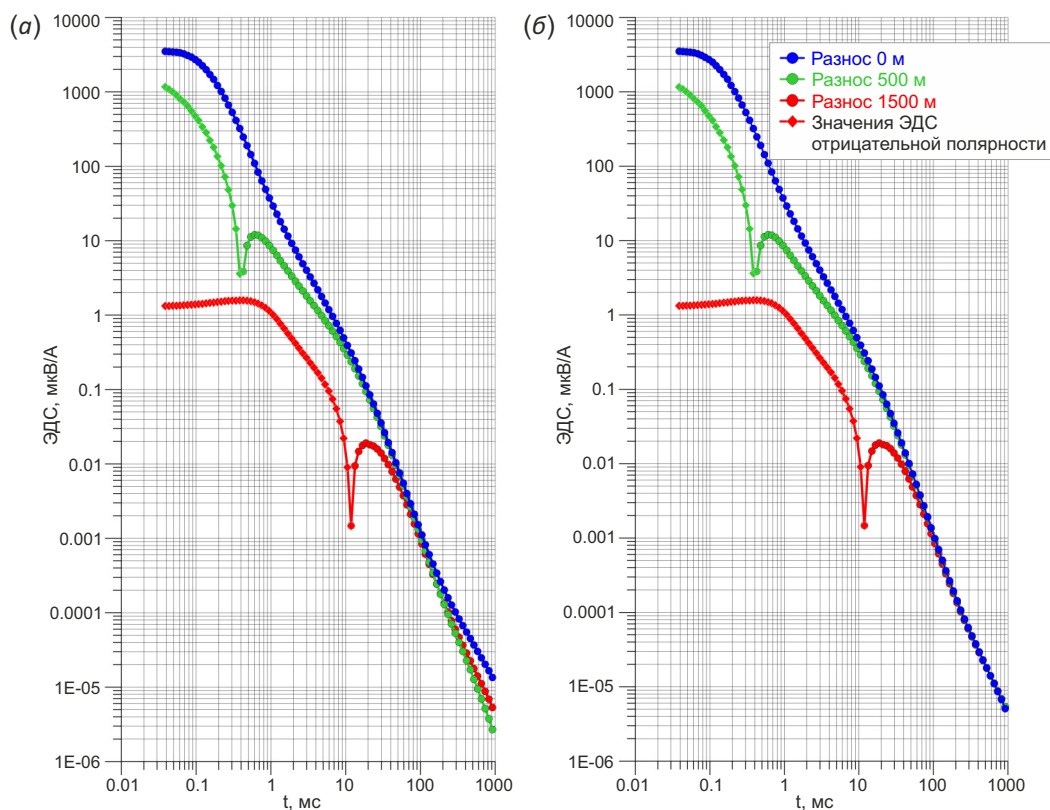


Рис. 5. Квазиэкспериментальные переходные характеристики для разносов 0, 500 и 1500 м (модель М1): (а) – исходные, (б) – после обработки с помощью алгоритма для снижения влияния МВ.
Fig. 5. Quasi-experimental transient responses for model M1 at offset of 0, 500 and 1500 m: total (а) and processed (б) with the algorithm for reducing the MV effect.

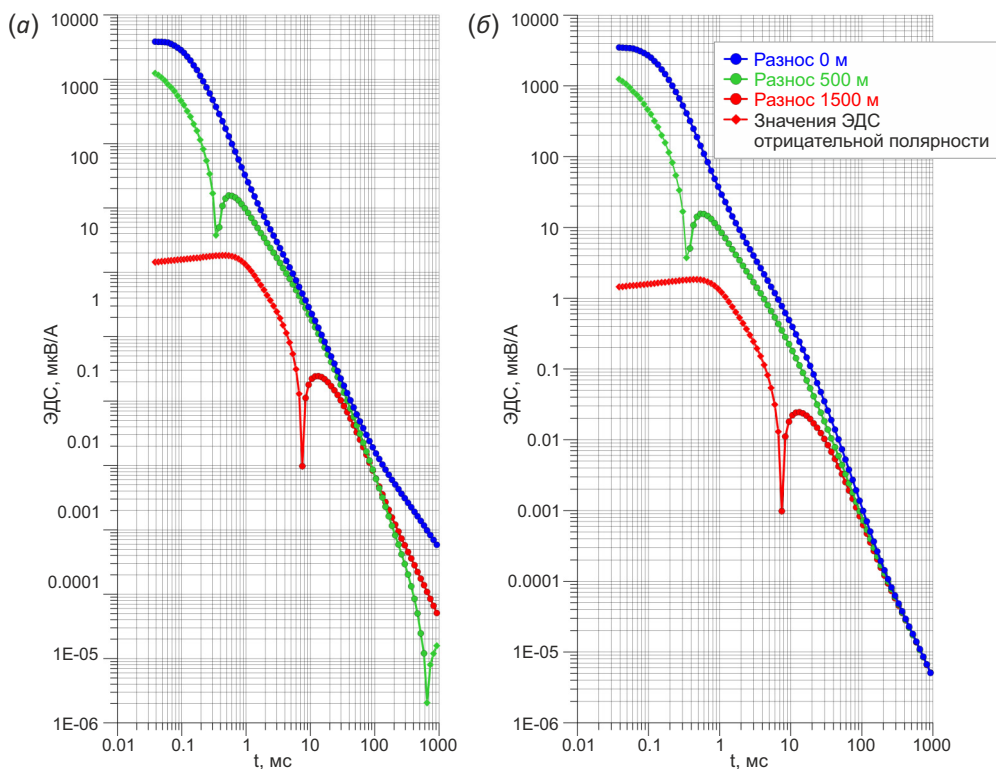


Рис. 6. Квазиэкспериментальные переходные характеристики для разносов 0, 500 и 1500 м (модель M2): (а) – исходные, (б) – после обработки с помощью алгоритма для снижения влияния МВ.

Fig. 6. Quasi-experimental transient responses for model M2 with 0, 500 and 1500 m spacing: total (a) and processed (б) with the algorithm for reducing the MV effect.

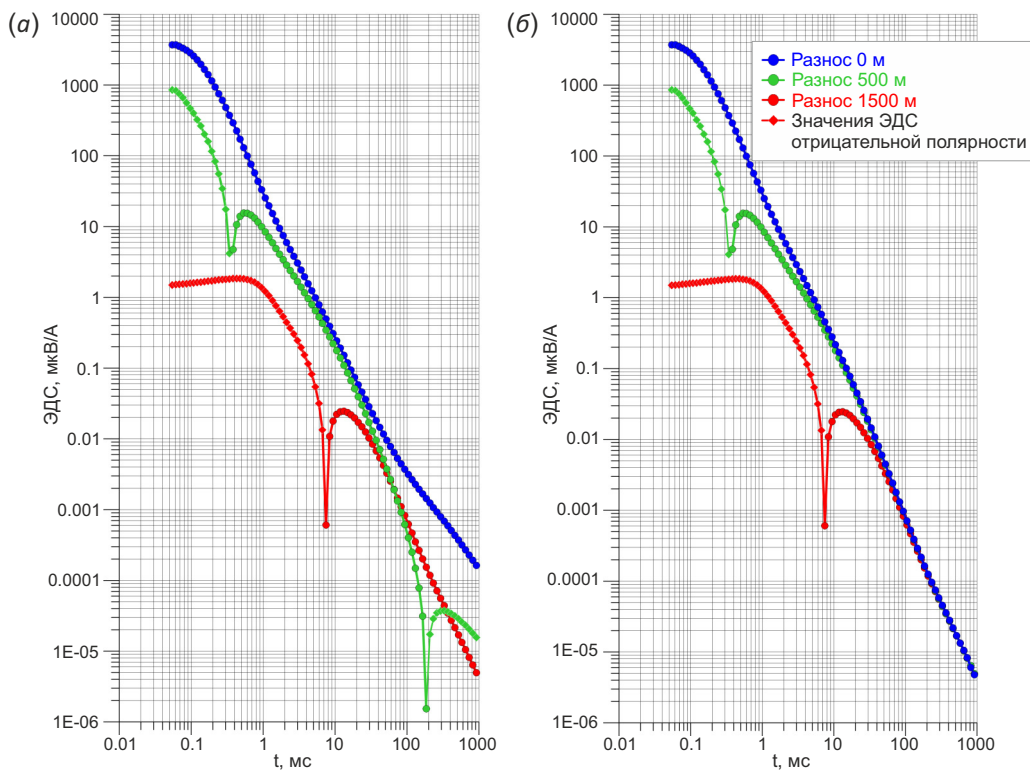


Рис. 7. Квазиэкспериментальные переходные характеристики для разносов 0, 500 и 1500 м (модель M3): (а) – исходные, (б) – после обработки с помощью алгоритма для снижения влияния МВ.

Fig. 7. Quasi-experimental transient responses for model M3 with 0, 500 and 1500 m spacing: total (a) and processed (б) with the algorithm for reducing the MV effect.

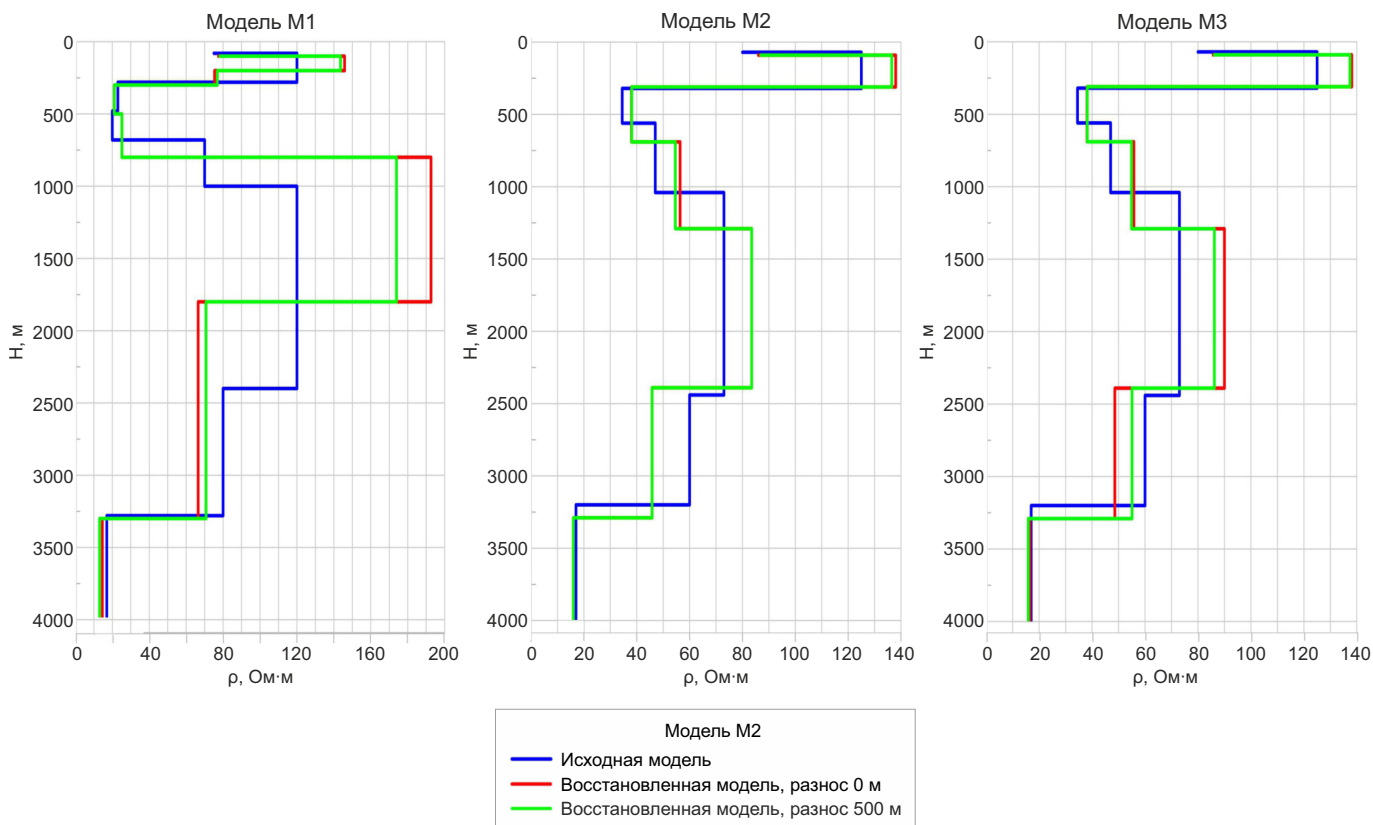


Рис. 8. Исходные и восстановленные геоэлектрические модели.
Fig. 8. Comparison of true geoelectric models with those found via inversion.

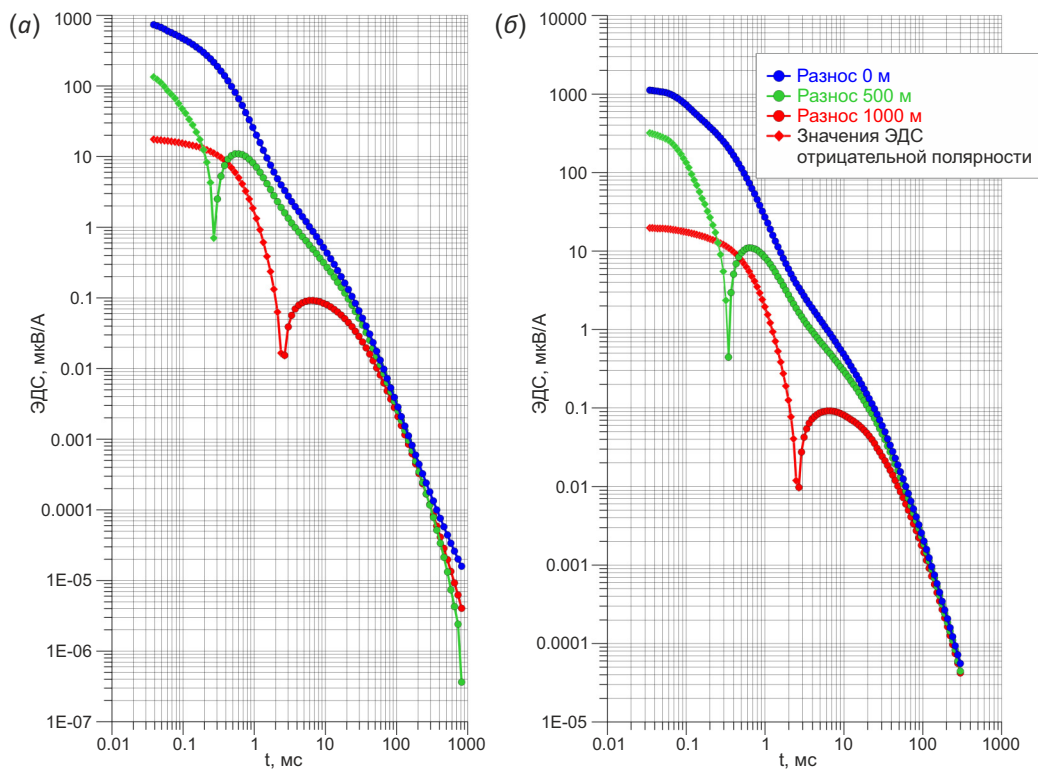


Рис. 9. Экспериментальные переходные процессы, осложненные МВ (разносы 0, 500, 1000 м), при длительности тока в источнике 1 с (а) и 0.05 с (б).
Fig. 9. Measured TEM voltage responses with manifestation of magnetic viscosity (with 0, 500, 1000 m spacing). Transmitter current pulse duration: 1 s (a) and 0.05 s (b).

погрешностью, приемлемой при поисково-оценочных исследованиях.

На заключительном этапе эксперимента интерпретатору были сообщены мощности слоев исходных геоэлектрических моделей. Это позволило улучшить качество подбора удельных электрических сопротивлений слоев. Благодаря этому для каждой из моделей среднеквадратическое отклонение между разностными и найденными в результате инверсии переходными характеристиками составило около 0.4 %.

7. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ

Кроме магнитной вязкости имеются и другие «геологические» помехи, осложняющие изучение распределения электропроводности, например трехмерные

неоднородности и ВПИ. В отличие от магнитной вязкости, вклады ВПИ и вихревых токов в результирующую переходную характеристику не являются аддитивными. Поэтому описанный выше алгоритм, если применить его к данным, осложненным влиянием ВПИ, только усугубит ситуацию. Очевидно, для его успешного применения необходимо предварительно определить природу «геологической» помехи и работать только с теми данными, которые осложнены влиянием именно магнитной вязкости.

Как уже упоминалось, длительность импульсов тока в генераторной петле влияет на начальное значение и скорость убывания ЭДС_{МВ}. При уменьшении длительности импульсов тока в генераторной петле скорость убывания ЭДС_{МВ} увеличивается. При выполнении полевых работ этот факт удобно использовать как индикатор, позволяющий отличить эффекты магнитной

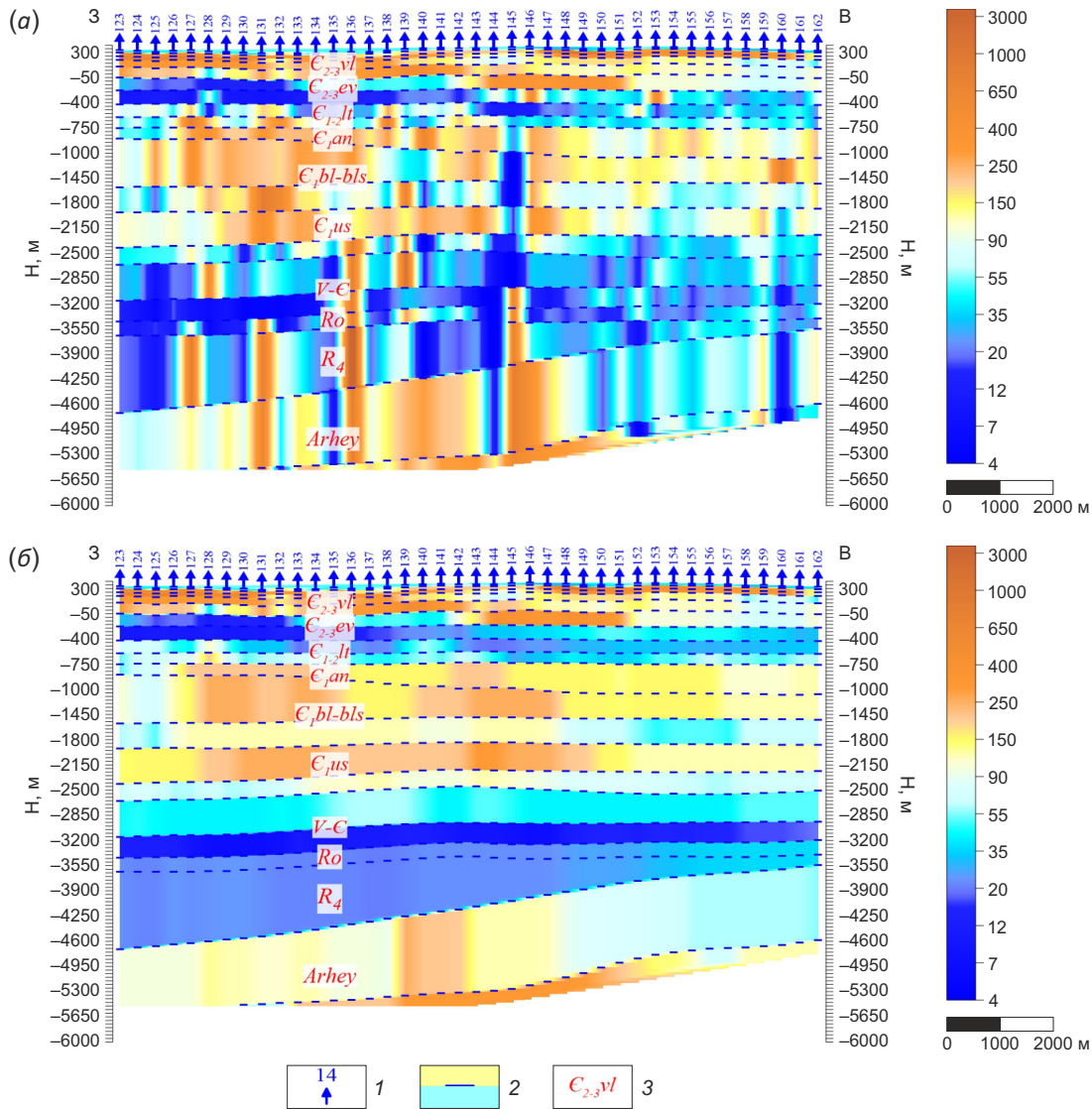


Рис. 10. Геоэлектрические разрезы, построенные в результате инверсии исходных (а) и обработанных с помощью алгоритма (б) данных. 1 – пункты ЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты; 3 – стратиграфические отбивки.

Fig. 10. Geoelectric sections based on inversion of measured TEM data (a), and of the data processed with the algorithm for reducing the MV effect (b). 1 – TEM points; 2 – geoelectric horizons; 3 – stratigraphic picks.

вязкости от других «геологических» помех. Пример полевых индукционных переходных характеристик, измеренных при разной длительности тока одной установкой, приведен на рис. 9.

На рис. 9, б видно, что на данных, полученных с коротким импульсом тока, эффект магнитной вязкости практически не проявляется. При увеличении длительности импульса тока влияние магнитной вязкости на поздних временах становится преобладающим (рис. 9, а).

Предлагаемый способ снижения влияния магнитной вязкости использовался для обработки полевых данных, полученных на одном из участков в зоне сочленения Катангской, Присаяно-Енисейской и Непско-Ботубобинской нефтегазоносных областей. Здесь отсутствуют глубокие скважины, поэтому для оценки перспектив нефтегазоносности привлекается информация о проявлениях углеводородов на соседних площадях и параметрах регионального геоэлектрического разреза.

Эффективность рассматриваемого подхода иллюстрирует рис. 10, где показаны геоэлектрические разрезы, построенные по результатам инверсии исходных данных с сильным проявлением эффектов магнитной вязкости (рис. 10, а) и обработанных с помощью алгоритма (рис. 10, б). Геоэлектрический разрез, построенный по результатам интерпретации исходных данных, особенно на больших глубинах, осложнен чередованием узких вертикальных зон необычно высокого и низкого удельного электрического сопротивления. Такая зональность противоречит представлениям о геологии района. Геоэлектрический разрез, построенный по результатам интерпретации данных, обработанных с помощью алгоритма для снижения влияния МВ, свободен от описанных выше «артефактов». Этот разрез, на котором наглядно проявлена глубинная структура осадочного чехла в районе исследований, позволил уточнить представление о геологическом строении участка работ.

8. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Отметим, что один из принципиальных моментов, касающихся рассмотренного выше способа, остается до конца не выясненным и поэтому дискуссионным. Как упоминалось выше, предпосылкой применения способа является близость геоэлектрической модели изучаемой среды к горизонтально-слоистой. Однако обосновать критерии, однозначно определяющие, насколько и как именно среда должна быть близка к горизонтально-слоистой, пока не представляется возможным. Это связано с отсутствием алгоритмов и программ для расчета индукционных переходных характеристик для сред с произвольным распределением электропроводности и магнитных свойств. Кроме этого, проблема анализа и обобщения результатов расчетов для огромного количества трехмерных моделей пока представляется неразрешимой.

Сказанное не означает, что использование рассмотренного подхода является необоснованным. Очевидно,

на данном этапе успех его применения зависит от того, для изучения каких геологических объектов он привлекается, и единственным критерием целесообразности его использования является практический результат. Во всяком случае, как иллюстрирует пример полевых съемок методом ЗСБ (рис. 10), способ снижения влияния магнитной вязкости показал несомненную эффективность при изучении глубинного строения территорий Сибирской платформы.

9. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны И.В. Буддо за помощь в формировании исходных геоэлектрических моделей и Е.В. Мурзиной за подготовку результатов интерпретации данных ЗСБ, а также И.А. Шелухову за помощь в подготовке графики. Авторы благодарны рецензентам – А.В. Поспееву и Я.К. Камневу за комментарии, которые были учтены при подготовке окончательной версии статьи.

10. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Bitner A.K., Pozdnyakov V.A., 2017. New Exploration Techniques. Hydrocarbon Deposits of the Siberian Platform and Adjacent Areas. Monograph. Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 324 p. (in Russian) [Битнер А.К., Поздняков В.А. Новые технологии геологической разведки. Месторождения углеводородов Сибирской платформы и прилегающих территорий: монография. Красноярск: СФУ, 2017. 324 с.]

Buddo I.V., Pospeev A.V., 2019. Precise Inversion of Transient Electromagnetic Sounding Method Data for Oil and Gas Exploration in the Southern Part of the Siberian Craton. ISU Publishing House, Irkutsk, 149 p. (in Russian) [Буддо И.В., Поспеев А.В. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. 149 с.]

Buselli G., 1982. The Effect of near Surface Superparamagnetic Material on Electromagnetic Transients. Geophysics 47 (9), 1315–1324. <https://doi.org/10.1190/1.1441392>.

Chikazumi S., Charap S.H., 1978. Physics of magnetism. Krieger Publishing Co., New York, 554 p.

Dabas M., Skinner J.R., 1993. Time-Domain Magnetization of Soils (VRM), Experimental Relationship to Quadrature Susceptibility. Geophysics 58 (3), 326–447.

Emerson D.W. (Ed.), 1980. The Geophysics of the Elura Orebody. Australian Society Exploration Geophysicists, 205 p.

Kamnev Ya.K., Kozhevnikov N.O., Kazansky A.Yu., Stefanenko S.M., 2015. Impulse Response of Viscous Remanent Magnetization: Laboratory Measurements by a Pulse Induction System. Russian Geology and Geophysics 56 (11), 2076–2091 (in Russian) [Камнев Я.К., Кожевников Н.О., Казанский А.Ю., Стефаненко С.М. Импульсная характеристика вязкой намагниченности и ее измерение с помощью лабораторной индукционной установки // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 11. С. 2076–2091]. <https://doi.org/10.15372/GiG20151110>.

Kompaniets S., Kozhevnikov N., 2018. Application of Multi-Offset Arrays in TEM Studies on the Siberian Platform. In: Extended Abstract of the 24th International Electromagnetic Induction Workshop (August 12–19, 2018). Helsingør, Denmark, 3 p.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., 2008. The Magnetic Relaxation Effect on TEM Responses of a Uniform Earth. *Russian Geology and Geophysics* 49 (3) 197–205 <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.02.004>.

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., 2018. Magnetic Viscosity Effect on Tem Data of an Array with a Fixed Transmitter Loop. *Russian Geology and Geophysics* 59 (6), 857–865 (in Russian) [Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние магнитной вязкости на индукционные переходные характеристики установки с закрепленной генераторной петлей // Геология и геофизика. 2018. Т. 59 № 6. С. 857–865]. <https://doi.org/10.15372/GiG20180607>.

Kozhevnikov N.O., Agafonov Yu.A., Antonov E.Yu., Buddo I.V., 2016. TEM Surveys for Magnetic Viscosity of Traps on the Siberian Platform. In: Subsoil Use. Mining. Directions and Technologies of Prospecting, Exploration and Development of Mineral Deposits. Economics. Geoecology. Proceedings of the XII International Scientific Conference (April 18–22, 2016). Vol. 2. Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, p. 28–32 (in Russian) [Кожевников Н.О., Агафонов Ю.А., Антонов Е.Ю., Буддо И.В. Проявления магнитной вязкости пород трапповой формации при работах методом ЗСБ на Сибирской платформе // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы XII Международной научной конференции (18–22 апреля 2016 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 2. С. 28–32].

Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Matasova G.G., Kamnev Ya.K., 2012. The Method of Transitional Processes in Studies of Geological Media with Magnetic Viscosity. *Geophysical Journal* 34 (4), 137–149 (in Russian) [Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Матасова Г.Г., Камнев Я.К. Метод переходных процессов при изучении геологических

сред с магнитной вязкостью // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 137–149].

Lee T.J., 1984. The Transient Electromagnetic Response of a Magnetic or Superparamagnetic Ground. *Geophysics* 49 (7), 854–860. <https://doi.org/10.1190/1.1441731>.

McNeill J.D., 1980. Applications of Transient EM Techniques. Technical Note TN-7. Geonics Ltd, Toronto, Canada, 17 p.

Sharlov M., Agafonov Yu., Buddo I., 2018. Possibilities for Processing TEM Data with Quality Check: TEM-Processing Software. In: Extended Abstract of the 24th International Electromagnetic Induction Workshop (August 12–19, 2018). Helsingør, Denmark, 4p.

Shemin G.G., 2007. Vendian and Cambrian Geology and Oil and Gas Potential of the Central Siberian Platform (Nepsko-Botuobin and Baikit Antecises and Katanga Saddle). IGG SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 467 p. (in Russian) [Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО РАН, 2007. 467 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2012. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1 000 000. Sheet 0-48 (Ust-Ilimsk). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 433 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангара-Енисейская. Масштаб 1:1 000 000. Лист 0-48 (Усть-Илимск): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 433 с.].

Stognii V.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y., 2010. TEM Surveys for Magnetic Viscosity of Rocks in Situ. *Russian Geology and Geophysics* 51 (11), 1219–1226. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.10.007>.

Zakarkin A.K., Bubnov V.M., 1995. Geoelectric Prospecting Method. A Patent on Invention № RU 2045083 C1 of September 27, 1995. ROSPATENT (in Russian) [Захаркин А.К., Бубнов В.М. Способ геоэлектроразведки: Патент на изобретение № RU 2045083 C1 от 27.09.1995. РОСПАТЕНТ, 1995].